

软硬交替地层超深竖井受力特性及 合理分层开挖厚度探讨

王 旭¹, 任 荣¹, 周王鹏², 陈保国²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:某检修排水井尺寸规模大,开挖深度深,所处地层条件复杂,具软硬交替特征。为确保竖井深基坑开挖稳定性,提高施工效率,利用三维数值模拟软件FLAC^{3D}对该超深竖井基坑开挖施工全过程进行仿真模拟,分析5种不同分层开挖厚度情况下超深竖井结构受力和变形特性。研究表明:1)地连墙的最大环向应力和最大水平位移均随分层开挖厚度的增加而增加,在软岩地层范围内出现应力和变形突增,在硬岩地层范围内出现应力和变形骤减;2)以无内衬开挖下地连墙最大环向应力和最大水平位移为参考标准,单层开挖厚度范围为3~4 m对地连墙位移具有很好的约束效果,建议实际工程中土层开挖及软岩开挖时采用3 m分层厚度,硬岩部分地层开挖时采用4 m分层厚度。

关键词:超深竖井; 地连墙; 软硬交替地层; 分层开挖; 水平位移

中图分类号:TU473.2

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)05-0011-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.05.056

Discussion on mechanical characteristics of ultra-deep shafts in boulders and reasonable layered excavation thickness

WANG Xu¹, REN Rong¹, ZHOU Wangpeng², CHEN Baoguo²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: A maintenance drainage well has a large scale, deep excavation depth, complex formation conditions and boulders. In order to ensure the stability of the excavation of the deep foundation pit and improve the construction efficiency, the whole process of the excavation of the ultra-deep shaft foundation pit is simulated by using the three-dimensional numerical simulation software FLAC^{3D}, and the stress and deformation characteristics of the ultra-deep shaft structure under five different layered excavation thicknesses are analyzed. The results show that: 1) The maximum hoop stress and maximum horizontal displacement of the diaphragm wall increase with the increase of layered excavation thickness, and the stress and deformation spurt occur within the soft rock strata, and the stress and abrupt deformation deceleration occur within the hard rock stratum; 2) Taking the maximum hoop stress and maximum horizontal displacement of the diaphragm wall under unlined excavation as the reference standard, the thickness range of single-layer excavation is 3~4 m, which has a good restraining effect on the displacement of the diaphragm wall, and it is recommended that the layered thickness of 3 m should be used for soil excavation and soft rock excavation in actual engineering, and the layered

收稿日期: 2023-04-03

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(LT-02-ZY-2022-[科研]-01)

作者简介: 王 旭(1988—),男,助理工程师,从事工程技术管理、施工技术研究。

通信作者: 周王鹏(1997—),男,硕士研究生,从事岩土工程领域相关研究工作。

thickness of 4 m should be used for the excavation of hard rock part of the formation. The results can provide guidance for on-site shaft construction and provide reference for ultra-deep shaft excavation under similar background.

Key words: ultra-deep shaft; diaphragm wall; boulders; stage excavation; horizontal displacement

随着中国城市化建设的迅速发展,竖井在水力工程领域得到广泛运用。然而竖井尺寸越大,开挖越深,面临的地质条件也越加复杂,工程问题也越加突出。许多学者采用数值模拟法对竖井的开挖施工过程进行模拟,以确定合理的施工方法。SUN 等^[1]采用三维离散单元分析法对软硬互层地层下围岩和竖井的受力和变形特征进行研究,发现最大剪应力和塑性区出现在软硬岩石交界面附近,且竖井结构在软硬岩层界面深度附近容易产生应力集中和弯矩;FAUSTIN 等^[2]基于 27 个竖井工程开挖时的地面沉降监测数据,对比分析了先支护后开挖和边开挖边支护两种竖井施工方式,发现采用边开挖边支护方式的竖井开挖对地层的扰动更加明显;龚亮等^[3]对比分析了地连墙在圆形基坑与矩形基坑中的受力和变形特征,认为现有基坑变形控制标准对于圆形基坑过大,并依据相关规范和实例提出了圆形竖井基坑的控制指标;岳云鹏等^[4]采用三维数值模拟手段研究了竖井开挖对下卧隧道的影响规律,发现当竖井开挖深度较浅时隧道上浮与开挖深度呈线性关系,而随着竖井开挖深度增加,隧道上浮明显加快。

既有研究表明,采用三维数值模拟手段进行超深基坑开挖方案研究合理可行,可为工程施工方案的优选提供依据。然而,既有研究成果未能涉及软硬交替地层中超深竖井合理分层开挖厚度研究。本文以罗田水库-铁岗水库输水隧洞工程某检修排水井(竖井深度为 77 m)为研究对象,通过三维数值模拟软件 FLAC^{3D}对竖井不同分层开挖厚度的施工方案进行仿真模拟,详细分析不同方案下围护结构的受力和变形特征,以期对竖井分层开挖厚度的优化提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

罗田水库-铁岗水库输水隧洞工程是珠江三角洲水资源配置工程在深圳境内配套工程,某检修排水竖井为该输水隧洞工程中重要的节点工程。

竖井外径为 34.9 m,开挖深度为 77 m。竖井围护结构由高压旋喷桩、地连墙、内衬 3 个部分组成,高压旋喷桩直径为 1.2 m,设计桩长平均约为 26 m,用于地连墙成槽时槽壁加固及止水,地连墙深度为 80 m,厚度为 1.2 m,内衬墙深度为 77 m,厚度分别为 1.2、1.5 m,具体如图 1 所示。

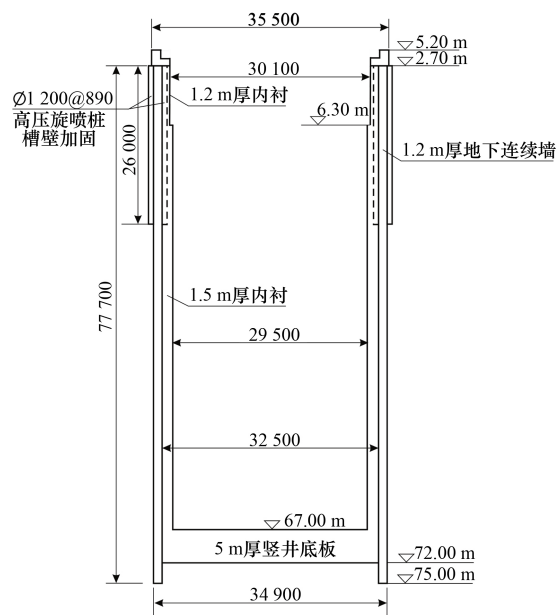


图 1 某检修排水井剖面 mm

1.2 工程地质条件

竖井具体揭露地层: 1) 人工填土层(1-④)厚度约为 5 m,底板埋深约为 5 m; 2) 淤泥质黏土层(5-①)厚度约为 3 m,底板埋深约为 8 m; 3) 砂质黏性土层(5-②)厚度约为 3 m,底板埋深约为 11 m; 4) 砂砾层(5-③)厚度约为 7 m,底板埋深约为 18 m; 5) 全风化泥质粉砂岩层(25-①)厚度约为 8 m,底板埋深约为 26 m; 6) 强风化泥岩层(25-②)厚度约为 6 m,底板埋深约为 32 m; 7) 弱风化泥质粉砂岩层(25-③)厚度约为 3 m,底板埋深约为 35 m; 8) 弱风化岩屑砂岩层(25-④)厚度约为 5 m,底板埋深约为 40 m; 9) 弱风化泥岩层(25-⑤)厚度约为 20 m,底板埋深约为 60 m; 10) 微风化泥质粉砂岩层(25-⑥)厚度约为 4 m,底板埋深约为 64 m; 11) 微风化岩屑砂岩层(25-⑦)厚度约为 10 m,底板埋深约为 74 m;

12) 微风化泥岩层(25-⑧)埋深大于 74 m。

地层岩性分布主要为泥质粉砂岩、岩屑砂岩和泥岩交替, 其中泥质粉砂岩和岩屑砂岩相对于泥岩为“硬岩”, 使地层表现出明显的软硬交替特征。该工程地质条件复杂, 竖井开挖深度大, 受力特性复杂, 工期长, 因此合理的分层开挖厚度对控制变形和施工进度尤为重要。

2 三维数值模拟

2.1 计算模型及土性参数

三维数值计算采用 FLAC^{3D} 软件, 由于圆形地连墙对变形控制效果较好^[5-7], 模型尺寸取 200 m × 200 m × 180 m(长 × 宽 × 高)。土层材料采用 Mohr - Coulomb 本构模型, 土层采用实体单元, 三维模型如图 2 所示, 岩土体物理力学参数如表 1 所示。

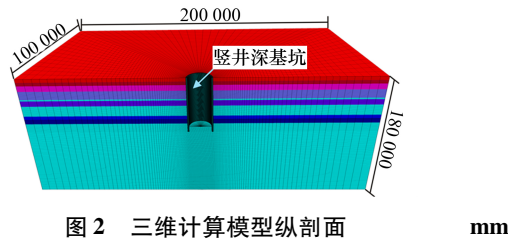


图 2 三维计算模型纵剖面

2.2 围护结构模拟

2.2.1 高压旋喷桩模拟

高压旋喷桩直径为 1.2 m, 桩间距为 0.89 m, 桩与桩间相互咬合形成排桩, 桩长穿过透水层, 用于后续地连墙成槽时加固槽壁及止水。数值模型中高压旋喷桩桩长为 26 m, 考虑土与桩的相互

作用, 采用 pile 单元^[8]。

2.2.2 圆形地连墙模拟

圆形地连墙外径为 35.5 m, 厚度为 1.2 m, 深度为 80 m, 由 C35 强度混凝土浇筑。采用实体单元进行模拟, 使用 Elastic 本构模型^[9]。

2.2.3 内衬模拟

内衬外径范围为 29.5 ~ 30.1 m, 厚度范围为 1.2 ~ 1.5 m, 深度为 77 m。内衬采用 C35 混凝土浇筑。竖井基坑每开挖一层施工一层内衬, 待内衬混凝土强度达到指定值时再进行下一步竖井基坑开挖。使用 Elastic 本构模型。

为考虑内衬混凝土的龄期影响, 利用弹性模量增长反映内衬混凝土的变形特性, 并用 FLAC^{3D} 内置 fish 语言根据每开挖一层等待 10 d 进行弹性模量赋值操作。根据现场条件, 内衬施工完后弹性模量随时间增长曲线如图 3 所示。

2.3 分层开挖工况设计

竖井全过程施工模拟流程: 1) 初始地应力模拟(只考虑重力影响, 忽略构造应力); 2) 钻孔灌注桩施工; 3) 地连墙施工; 4) 分析初始位移, 并进行下一步分析前的位移清零。根据不同分层开挖厚度循环施工至设计开挖深度, 同时根据内衬混凝土弹性模量增长曲线利用 fish 语言分阶段进行参数赋值。为充分反映不同分层开挖厚度对竖井围护结构影响, 共设计 5 种不同分层厚度工况, 和 1 种无内衬开挖工况。分层工况如表 2 所示。

表 1 地层物理力学参数

地层编号	地层名称	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	密度/cm ³
1-④	人工填土	10.5	0.34	10	5	1.85
5-①	淤泥质黏土	7.2	0.33	4	4	1.80
5-②	砂质黏性土	11.7	0.34	16	20	1.92
5-③	砂砾	30.9	0.32	29	0	2.07
25-①	全风化泥质粉砂岩	12.6	0.34	18	23	1.94
25-②	强风化泥岩	210.0	0.21	38	160	2.25
25-③	弱风化泥质粉砂岩	2 500.0	0.29	34	600	2.53
25-④	弱风化岩屑砂岩	4 500.0	0.32	40	900	2.50
25-⑤	弱风化泥岩	600.0	0.35	38	300	2.40
25-⑥	微风化泥质粉砂岩	4 000.0	0.34	40	650	2.53
25-⑦	微风化岩屑砂岩	9 000.0	0.30	50	950	2.56
25-⑧	微风化泥岩	900.0	0.33	38	330	2.50

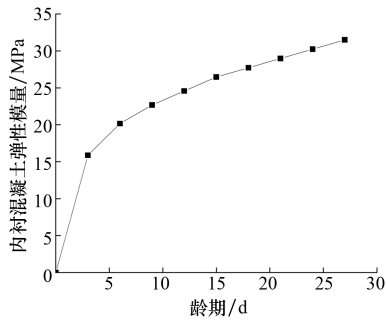


图 3 内衬混凝土弹性模量增长曲线

表 2 工况设计

序号	分层开挖厚度/m	最后一层开挖厚度/m	累积开挖深度/m	总共开挖步数/次
1	2	3	77	38
2	3	2	77	26
3	4	1	77	20
4	5	2	77	16
5	6	5	77	13

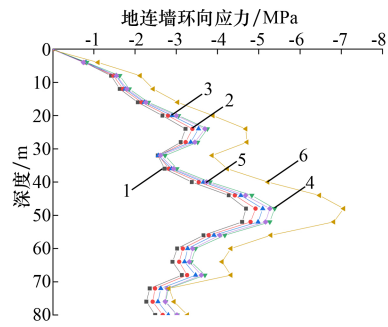
3 地连墙受力变形特征分析

3.1 地连墙环向应力特征

图 4 为不同工况下地连墙环向应力沿深度方向的变化规律,其中负值为环向应力为压应力。由图 4 可知:沿地连墙深度方向地连墙环向应力变化规律总体为涨肚型,局部环向应力因岩性突变表现为突增或骤减。不同开挖厚度下环向压应力值突增出现在 25 及 50 m 深度处,分别为全风化泥质粉砂岩和弱风化泥岩地层范围内;环向压应力值骤减出现在 33 及 65 m 深度处,分别为弱风化泥质粉砂岩和微风化岩屑砂岩地层范围内。当分层开挖厚度为 2 m 时,地连墙最大环向压应力值为 4.69 MPa;当分层开挖厚度为 3 m 时,地连墙最大环向压应力值为 4.92 MPa;当分层开挖厚度为 4 m 时,地连墙最大环向压应力值为 5.10 MPa;当分层开挖厚度为 5 m 时,地连墙最大环向压应力值为 5.38 MPa;当分层开挖厚度为 6 m 时,地连墙最大环向压应力值为 5.27 MPa。当无内衬开挖时,地连墙最大环向压应力值为 7.06 MPa。

3.2 地连墙轴向变形特征

图 5 为 6 种工况下地连墙的水平位移值。由图 5 可知:地连墙的最大水平位移值随分层厚度的增加而增加,最大水平位移值、最大位移突增

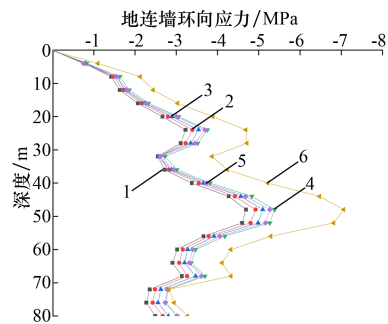


分层厚度/m: 1—2; 2—3; 3—4;

4—5; 5—6; 6—无内衬开挖。

图 4 不同工况下地连墙环向应力曲线

和骤减均与环向应力变化规律一致,在软岩部位出现最大位移值和位移突增,在硬岩部位出现骤减。当分层开挖厚度为 2 m 时,地连墙最大水平位移为 2.54 mm;当分层开挖厚度为 3 m 时,地连墙最大水平位移为 2.81 mm;当分层开挖厚度为 4 m 时,地连墙最大水平位移为 3.13 mm;当分层开挖厚度为 5 m 时,地连墙最大水平位移为 3.41 mm;当分层开挖厚度为 6 m 时,地连墙最大水平位移为 3.48 mm。当无内衬开挖时,地连墙最大水平位移为 4.28 mm。



分层厚度/m: 1—2; 2—3; 3—4;

4—5; 5—6; 6—无内衬开挖。

图 5 不同工况下地连墙水平位移

3.3 分层开挖厚度选取

为了更直观地反映出不同分层厚度开挖对竖井稳定性影响,假定不同分层厚度下地连墙最大水平位移值(最大环向应力值)与无内衬开挖地连墙最大水平位移值(最大环向应力值)的比值乘以 100% 为 R ,通过 $(100\% - R)$ 来评价分层开挖约束效果。

表 3 为不同开挖工程时地连墙约束效果。由表 3 可知:2 m 分层厚度对地连墙环向应力的约束效果为 33%,对地连墙位移的约束效果为 41%;

3 m 分层厚度对地连墙环向应力的约束效果为 30%, 对地连墙的位移约束效果为 34%; 4 m 分层厚度对地连墙的环向应力约束效果为 28%, 对地连墙的位移约束效果为 27%; 5 m 分层厚度对地连墙的环向应力约束效果为 25%, 对地连墙的位移约束效果为 20%; 6 m 分层厚度对地连墙的环向应力约束效果为 23%, 的约束效果为 19%。当竖井分层开挖厚度越小时, 地层卸荷应力越小, 同时内衬的支护效果越加明显, 墙后土压力由地连墙和内衬共同承担, 此时地连墙的约束效果最好。而随着竖井分层厚度增加, 由于混凝土凝期的影响, 内衬无法立即发挥出支护效果, 此时每开挖一层产生的卸荷应力逐渐主要由地连墙承担, 从而使得地连墙出现较大的变形和应力集中。

表 3 不同工况下地连墙约束效果 %

不同开挖工程	分层厚度/m				
	2	3	4	5	6
地连墙环向应力	33	30	28	25	23
地连墙水平位移	41	34	27	20	19

4 结 论

(1) 地连墙最大环向应力和水平位移均随分层开挖厚度增加而增加, 在软岩全风化泥质粉砂岩和弱风化泥岩深度范围内出现地连墙环向应力及水平位移突增, 在硬岩弱风化泥质粉砂岩和微风化岩屑砂岩深度范围内出现地连墙环向应力及水平位移骤减。

(2) 以无内衬开挖地连墙的受力和变形为基准, 评价了不同分层厚度开挖对地连墙的环向应力和水平位移的约束效果, 发现随分层厚度增加, 地连墙的约束效果近似线性下降, 当分层开挖厚度从 2 m 提升到 6 m 时, 地连墙约束效果降低了

约一半。根据地连墙约束效果及实际施工时长, 建议在土层及软岩部位采用 3 m 分层厚度开挖, 在硬岩部位采用 4 m 分层厚度开挖。

参考文献:

- [1] SUN X M, LI G, ZHAO C W, et al. Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling [J]. Processes, 2018, 7(1): 1450 - 1463.
- [2] FAUSTIN N, ELSHAFIE M, MAIR RJ. Case studies of circular shaft construction in London [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2018, 171(5): 1765 - 1753.
- [3] 龚亮, 靳建军, 陈胜, 等. 深埋隧道圆形基坑围护结构变形特性及控制指标探讨 [J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 316 - 322; 346.
- [4] 岳云鹏, 郑先昌, 胡志敏, 等. 竖井工法开挖深基坑对下卧既有隧道上浮的控制 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4977 - 4984.
- [5] 贺伟, 凡子义, 崔剑峰, 等. 坭洲水道桥圆形地连墙支护体系监测与分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 549 - 555.
- [6] 朱渊, 谭勇, 秦朋, 等. 超深圆形基坑施工期监测数据分析与研究 [J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(3): 34 - 37; 53.
- [7] 徐前卫, 龚振宇, 孙梓栗, 等. 滇中引水工程超深圆形基坑施工变形和内力监测结果分析 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(6): 102 - 111.
- [8] 徐文刚, 辛力, 余旭荣, 等. FLAC^{3D} 桩结构单元模拟抗滑桩参数取用探讨 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(2): 168 - 173.
- [9] 徐健, 周子涵, 王林枫, 等. 软土地区邻近既有建筑半盖挖深基坑变形特征 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 71 - 77.