

DOI: 10.7672/sgjs2025070151

有限空间下硬岩地层小截面竖井开挖施工技术*

陈泽盟¹, 李 帅¹, 陈浩然²

(1. 中交二公局第四工程有限公司, 河南 洛阳 471000; 2. 中交二航局建筑科技有限公司, 湖北 武汉 430050)

[摘要] 竖井作为城市轨道交通建设中的重要环节, 施工时通常会面临特殊地质条件及复杂环境等情况, 风险较大。以重庆市轨道交通 15 号线二期土建工程 13 标段竖井工程为依托, 通过有限元软件 MIDAS GTS NX 对竖井开挖过程进行模拟, 分析开挖后竖井支护结构及围岩的稳定性, 并针对有限空间下硬岩地层竖井施工进行了技术总结。研究表明: 随着开挖进行, 下层支护结构受力不断减小, 围岩竖向位移沿井壁向下不断降低, 围岩最大应力出现在竖井底部未开挖中间位置。针对有限空间下硬岩地层小截面竖井开挖问题, 选用旋挖钻引孔、倒挂井壁法施工, 保证了施工效率和安全性。

[关键词] 轨道交通; 竖井; 硬质岩层; 有限元分析; 施工技术

[中图分类号] U455.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0151-06

Construction Technology for Small Cross Section Vertical Shaft Excavation in Hard Rock Strata Under Limited Space

CHEN Zemeng¹, LI Shuai¹, CHEN Haoran²

(1. CCCC-SHEC Forth Engineering Co., Ltd., Luoyang, Henan 471000, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Construction Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China)

Abstract: As an important part of urban rail transit construction, shafts usually face special geological conditions and complex environments during construction, and the risk is high. Based on the shaft project of the 13th bid section of the second phase of the civil engineering project of Chongqing Rail Transit Line 15, the excavation process of the shaft is simulated by the finite element software MIDAS GTS NX, and the stability of the supporting structure and surrounding rock of the shaft after excavation is analyzed, and the construction of the shaft in the hard rock stratum under the limited space is summarized. The results indicate that with the excavation, the stress of the lower supporting structure decreases continuously, the vertical displacement of the surrounding rock decreases continuously along the shaft wall, and the maximum stress of the surrounding rock appears at the middle position of the bottom of the shaft without excavation. Aiming at the excavation problem of a small cross-section shaft in hard rock stratum under limited space, the method of rotary drilling to guide holes and the reversed shaft wall method is selected to ensure the construction efficiency and safety.

Keywords: rail transit; vertical shaft; hard rock layers; finite element analysis; construction

0 引言

随着我国地下交通建设的不断推进, 竖井作为连通地下空间的通道, 已在多领域得到广泛应用^[1-4]。而城市中面对复杂地质条件和不同施工环

境, 提高施工效率并保证施工安全成为竖井施工的首要目标。因此, 应根据实际工程特点制定针对性的施工方案, 采用合理的开挖方法和支护措施, 确保竖井施工的安全性^[5-7]。

目前, 针对特殊环境下的竖井施工已有诸多学者进行了相关研究, 且多集中在施工方案及安全措施方面。王慧娟等^[8]通过有限元软件对某竖井及其井壁支护结构进行了非线性有限元计算, 得出了竖井在施工过程中的应力变化状态, 并分析了竖井

* 国家自然科学基金(U1604135); 中交第二公路局有限公司重点科研项目(2023-3-17); 河南省科技厅产学研合作项目(2015HNCXY011)

[作者简介] 陈泽盟, 硕士, 工程师, E-mail: 1176342320@qq.com

[通信作者] 陈浩然, 硕士, 助理工程师, E-mail: 1585803167@qq.com

[收稿日期] 2024-08-03

可能破坏的形式。秦政等^[9]针对复杂环境下破碎地层竖井施工进行研究,优化了竖井掘进机形式,总结了施工工艺,并通过有限元软件和实际施工监测数据验证了局部爆破开挖组合施工方式针对复杂环境下的竖井施工具有良好效果。刘兵科等^[10]以北京某地铁工程超深地铁竖井施工为背景,运用 FLAC3D 软件对该竖井施工进行模拟,对不同工况下的地表沉降和支护结构受力进行计算,发现支护结构受力和变形会随着施工的进行不断增大。濮奇浩等^[11]针对某软弱地层排风竖井工程,建立了施工全过程有限元分析模型,通过分析不同开挖厚度和不同衬砌施工方案下的围岩支护结构力学状态,得出可通过加强超前支护和减小开挖层厚等措施来提高竖井施工稳定性。孙强^[12]通过 ANSYS 有限元软件对某竖井施工过程进行模拟,结合计算结果对竖井施工参数进行优化,减小了特定区域锚杆长度和旋喷墙厚度,保证安全性的同时节省了施工材料。周雄华等^[13]通过对某特长隧道通风竖井工程进行研究,发现竖井开挖深度加大,结构变形及内力均增大,但其趋势逐渐放缓。江中勇^[14]通过数值模拟方法对地铁隧道通风竖井对地层变形影响进行了研究,提出了合理的竖井施工和加固方案。

本文依托重庆市轨道交通竖井工程,采用有限元软件 MIDAS GTS NX 对竖井开挖过程进行模拟,分析了竖井开挖后的围岩-支护结构受力和变形,针对狭小施工空间、硬岩地层工况下的竖井施工技术进行总结,可为类似竖井施工提供借鉴。

1 工程概况

1.1 项目概况

重庆市轨道交通 15 号线二期土建工程 13 标段全长为 3.289km。其中大学城南站—陈家桥站区间设置一处联络线,连接 15 号线与 27 号线。为便于联络线施工,在该段内设置 1 座竖井,竖井净空为 9.0m×6.0m,深 35.25m,初衬结构厚度 290mm,采用倒挂井壁法施工。竖井为临时竖井,区间结构施工完成后进行回填施工,并凿除地面以下 3m 范围内竖井结构。

竖井施工区域属于构造剥蚀丘陵地貌,地形较为平缓,地面坡角一般为 10°~15°,竖井顶部覆盖有厚度 5~10m 的残积层和坡积层。竖井穿越岩层和联络线区间隧道穿越岩层主要有砂岩、砂质泥岩,围岩级别为Ⅳ级,覆岩厚度为 12.5~33.1m。竖井结构布置如图 1 所示。

1.2 工程难点

该工程施工难点为:①依据项目地勘报告,竖

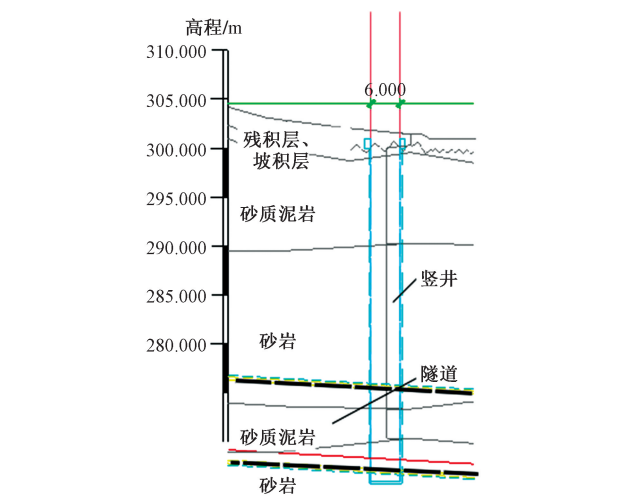


图 1 竖井结构布置
Fig. 1 Structure layout of vertical shaft

井位置岩层分布以砂岩、砂质泥岩为主,岩石强度较高,天然抗压强度可达 16.7~31.8MPa,同时机械设备作业空间狭小,无法配备多台设备进行组合开挖;②竖井开挖深度较深,开挖越深,保证竖井井口稳定性越重要,同时选择合理、经济的竖井开挖支护方式;③对环境保护要求极高,竖井位于规划公园用地内,对安全文明施工的要求也很高。

针对上述问题,竖井施工采用单台设备进行破除+开挖+装运土石方作业,施工过程中需多次进行破头及挖斗更换,需要加强各工作面之间的协调,提高施工效率;竖井围岩强度较高,为保证施工进度,采用旋挖钻机进行引孔作业,对围岩地应力进行提前释放,旋挖钻机引孔后及时进行虚土回填,再进行下一孔位施工,可保证竖井开挖掘进时土层的稳定性;针对小断面开挖特点,采用小型挖机进行围岩开挖,对于开挖后的围岩采用锚杆、钢架、钢筋网喷射混凝土加固的方法,控制开挖变形;竖井施工期间,合理规划施工场地、严格控制污水处理、防止水污染、扬尘、噪声污染、光污染等。

2 竖井开挖数值计算

2.1 模型建立

为研究竖井开挖过程稳定性,采用有限元软件 MIDAS GTS NX 对竖井分层开挖过程进行模拟,对砂质泥岩层和砂岩层进行分步开挖模拟,对开挖过程中的锚杆、内支撑和围岩稳定受力进行分析。竖井支护、衬砌结构按实际施工混凝土参数进行选取,锚杆单元按实际施工尺寸进行选取。计算边界取竖井井口长度的 5 倍,对模型左边界、右边界和下边界进行约束。竖井结构参数如表 1 所示,计算力学参数取值如表 2 所示。

表 1 竖井结构支护参数

Table 1 Support parameters of vertical shaft structural

项目	结构尺寸	材料及规格	备注
井口放坡喷混凝土	厚度 100mm	C25 喷射混凝土	早强
钢筋网	φ8@ 200×200	双层钢筋网	钢筋网搭接长度大于 2 个网格
砂浆锚杆	水平、竖向间距 2m	φ22, L=2. 5m	水平倾角 15°, 梅花形布置
钢架	间距 1 000mm	I22a	钢架内外侧设双层 φ22 连接筋, L=1m, 环向间距 1m
井身喷混凝土	厚度 290mm	C25 喷射混凝土	早强

表 2 计算力学参数

Table 2 Calculated mechanical parameters

名称	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
C25 混凝土	2 500	28. 0	0. 17
钢架	7 850	206. 0	0. 30
锚杆	7 850	200. 0	0. 30

模型计算分为 3 个步骤,首先开挖最上层土体,开挖后激活支护结构;之后开挖第 2 层土体,继续激活开挖段支护及锚杆;最后进行第 3 层土体开挖,同上述步骤一致。对上述 3 个步骤开挖完成后的竖井结构进行计算,并将锚杆、钢架、开挖围岩计算结果进行提取,计算结果如图 2~6 所示。

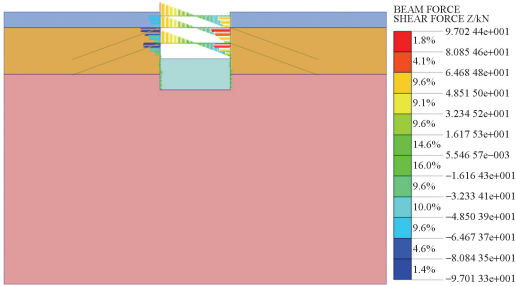


图 2 钢架剪力
Fig. 2 Shear force of steel frame

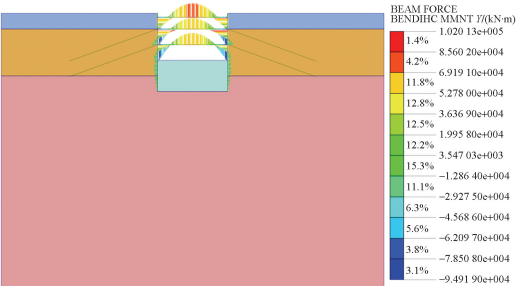


图 3 钢架弯矩
Fig. 3 Bending moment of steel frame

2.2 计算结果分析

由图 2、图 3 可知,竖井开挖过程中及时进行型钢钢架施工,其中最大剪力出现在最上层钢架两侧,最大剪应力为 97. 02kN,随着开挖进行,下层钢架较上层钢架最大剪力值逐渐减小;竖井中的钢架支撑受力为中间受拉、两端受压,最大正弯矩出现在最上层

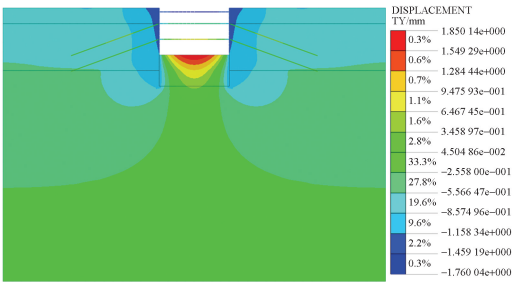


图 4 围岩竖向位移
Fig. 4 Vertical displacement of surrounding rock

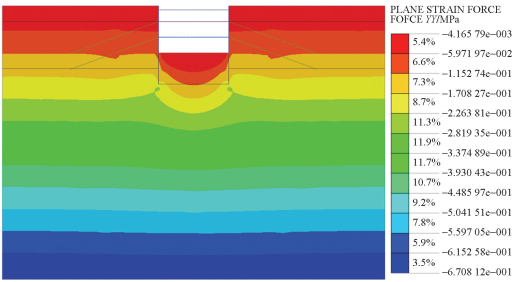


图 5 围岩应力
Fig. 5 Stress of surrounding rock

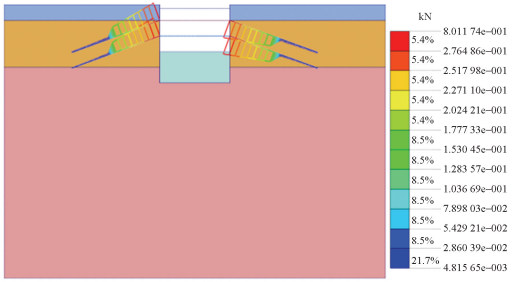


图 6 锚杆轴力
Fig. 6 Axial force of anchor rod

钢架中间位置,其值为 $1.020 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}$,最大负弯矩出现在钢架两端,其值为 $-9.491 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$,随着开挖进行,下层钢架弯矩较上层不断降低。由图 4、图 5 可知,围岩最大沉降量出现在竖井井口处,为 1. 76mm,沿井口至开挖底部,围岩沉降量不断减小,可见在支护措施作用下围岩的稳定性得到有效保证,同时在围岩应力作用下,竖井未开挖底部中间位置出现隆起,最大变形量为 1. 85mm;竖井施工中在支护系统的作用下,围岩应力较小,其中最大应

力出现在竖井底部中间位置,最大值为 $6.708 \times 10^{-1} \text{MPa}$,应力分布向四周扩散并不断减小。由图 6 可知,锚杆在竖井壁位置出现最大轴力,最大值为 $4.915 \times 10^{-3} \text{kN}$ 。

3 施工工艺流程

3.1 施工准备

竖井施工时作业空间有限,开挖深度较大,施工前需先进行多项准备工作。

1) 临边防护采用工具化防护围栏,立柱采用 $40 \text{mm} \times 40 \text{mm}$ 方钢,立柱上共设置 3 道 $50 \text{mm} \times 50 \text{mm} \times 6 \text{mm}$ 的钢板,3 道连接板均使用 10mm 螺栓固定连接。底部 300mm 处设置钢板作为踢脚板,中间设置钢板网,立柱和踢脚板表面刷红白相间油漆警示,钢板网刷红色油漆,并张挂安全警示标牌。

2) 通风管理中需保证风管安装平、直、顺,并且要加强日常维修和管理,专职安全人员对现场通风效果进行检测,保证井内气温不得高于 28°C 、一氧化碳和二氧化氮浓度在通风 30min 后分别降至 $30 \text{mg}/\text{m}^3$ 和 $5 \text{mg}/\text{m}^3$ 以下,以满足施工需要,并根据检测结果及时进行调整。同时为应对竖井施工中可能出现的井壁渗水状况,可采用速凝水泥进行堵漏。

3.2 锁口圈梁施工

锁口圈梁施工前对竖井范围内管线进行迁改,避免因未知管线对施工造成影响,锁口圈梁位置内以人工开挖为主。

人工开挖锁口圈梁土体完成后,采用人工配合机械开挖竖井口土体。锁口圈梁开挖时控制好开挖边线,防止超挖,开挖完毕后对开挖壁面整平,对底面压实。测量定位锁口圈梁位置,并用白灰放出 $1:0.5$ 开挖边线,土方采用挖掘机开挖,先挖中部,后挖四周,底部预留 $20 \sim 30 \text{cm}$ 土方采用人工开挖找平。圈梁开挖尺寸 $12.7 \text{m} \times 9.7 \text{m}$,锁口圈梁基坑开挖至设计深度,沿圈梁范围内浇筑 100mm 厚 C20 混凝土垫层,便于后续钢筋绑扎、浇筑混凝土作业。

在土方开挖结束后即可进行锁口圈梁钢筋安装,钢筋安装应注意竖井井壁初支结构竖向连接筋锚入圈梁的长度须满足设计要求,提升井架在锁口圈梁上设计有井架基础,井架基础预埋件安装应在锁口圈梁钢筋安装时完成。锁口圈梁截面尺寸 $1000 \text{mm} \times 1200 \text{mm}$,横向箍筋为 $\phi 5 @ 250$,横向纵筋为 $\phi 18 @ 280$ 。

3.3 竖井开挖

1) 旋挖钻机引孔

竖井施工采用倒挂井壁法,结合竖井工程地质

条件、净空结构尺寸等工程特征,考虑到竖井岩石强度高、小型开挖机械破碎能力弱、机械作业范围小、大型设备无法满足作业空间等因素,为保证竖井基坑开挖方案实施具有可操作性,竖井在机械开挖前采用 XR360 旋挖钻机进行引孔作业,钻孔尺寸 $\phi 800 \text{mm}$,均匀分布钻孔 24 个(6 列 $\times$ 4 排),为保证竖井基坑稳定,旋挖钻机引孔回填后,再进行下一孔位施工。引孔作业完成后进行竖井开挖支护作业。

2) 土石方开挖

经旋挖钻机引孔后,各孔之间的岩体经旋挖钻机扩孔和施工扰动,竖井内土石方基本松散,小型挖掘机即可完成开挖。在开挖过程中采用悬吊垂线方法,防止竖井周边超欠挖,确保开挖质量满足设计及规范要求。

竖井设计内轮廓尺寸为 $6 \text{m} \times 9 \text{m}$ 。竖井井身开挖在圈梁混凝土达到设计强度后进行,土石方采用挖机(带破碎锤)进行开挖、松料、集渣。竖井单次掘进深度不宜超过 1m ,待单次掘进竖井支护完成后方可进行下一阶段开挖。开挖时按先中间后四周、分块开挖、错开施工的方式,人工挖除欠挖部分土方并修整,井壁允许平均超挖厚度按 100mm 计。竖井内施工空间有限,挖机在作业过程中应注意不得碰撞支护结构,并采取措施防止支护掉落、松散。

3) 出渣及外运

竖井内土石方向外运输通过门式起重机+渣箱完成,吊运至临时渣土坑,渣土坑应设置在竖井施工区域 2m 以外,再用挖机装车将渣土外运,离开场地前,做好清洗覆盖,确保无扬尘、无污染,外运时渣土车应严格按照规定运输路线行驶,如有遗撒及时通知项目部及运输班组负责人,立即清理。

3.4 支护措施

竖井支护采用格栅钢架+注浆锚管+钢筋网+喷混凝土形式,格栅钢架整榀安装,混凝土随挖随喷。下一榀土石方开挖时必须将上一榀格栅钢筋及钢筋网片附着的土体清理干净,不能留死角,并与下一榀连接钢筋、钢筋网片焊接牢固。

1) 注浆锚杆施工

注浆锚杆采用 $\phi 22$ 普通砂浆锚杆,单根长 2.5m ,每 2 榀钢架设置 1 圈,水平间距 2m 。倾角 15° ,注浆材料选用水泥砂浆,强度等级为 M30,注浆压力为 $0.4 \sim 0.6 \text{MPa}$,锚杆施作完成后,进行拉拔试验。

2) 型钢钢架施工

钢架按设计要求预先加工成型,再分节段运至

洞内拼装,每2榀设置1组,其中3m节段6个,2.29m节段2个,4.29m节段2个,3.394m角撑节段4个。每节端头设置连接板,连接板采用15mm厚钢板,分接头1、接头2、接头3共3种规格,接头1单块尺寸270mm×220mm,接头2单块尺寸270mm×220mm,接头3单块尺寸330mm×220mm,各单元用4×M26螺栓在连接板处连接。型钢拱架安装过程中,要确保每个节点准确到位且连接可靠,型钢拱架与壁面之间的间隙必须用喷射混凝土充填密实,保护层厚度为35mm。

3) 钢筋网施工

施工前先清理围岩面,初喷1层2~3cm厚混凝土对围岩进行封闭,锚杆施工完毕,再进行钢筋网布设。为便于挂设,钢筋网分块加工,钢筋网格间距按200mm×200mm加工,网格搭接长度≥20cm,钢筋网要保证表面干净,不得有油污、锈渍。

采用湿喷法在钢筋网表面喷射混凝土,喷射混凝土强度等级为C25,厚350mm。喷射混凝土作业自下而上,分段进行,片段间的接合部应妥善喷射,不得存在漏喷部位。喷距控制在0.6~1.2m,采取螺旋形轨迹喷射施工工艺;喷射分两次进行,先初喷3~5cm及早封闭围岩,填平岩面,在布设锚杆、架好钢架后进行复喷至设计厚度。下一层喷射在前一层混凝土终凝后进行,对于有渗漏水的岩面,喷射混凝土前应做好引水处理,然后再喷混凝土,并从小无水处向有水处逐步逼近。喷射作业紧跟开挖工作面,混凝土终凝至下一循环时间不少于3h,喷射混凝土的回弹率应不大于15%。喷射混凝土终凝2h后,及时对喷射混凝土洒水养护,养护时间不得少于7d。

4) 加强环梁施工、超前支护施工

当开挖至施工隧道顶时,为做好竖井与暗挖段衔接工作,确保结构安全,开始进行加强环梁施工,环梁尺寸300mm×500mm。加强环梁施工完毕后,打设φ42超前小导管,长度为6m,环向间距为0.4m,拱部设置2环,纵向间距2m,外插角10°~15°,密排放置3榀I16钢架,形成超前支护。临时施工竖井底部设置一集水坑,以便在施工横通道和主体结构时,进行集水,再由水泵抽至地表排放。竖井两侧不能同时开马头门,一侧开马头门完成且区间隧道开挖支护完成10m才能开另一侧的马头门,且在马头门施工过程中加强监测。

4 竖井封底

竖井封底厚度为350mm,采用双层钢筋网片+工字钢(I22a)+喷射混凝土(C25)结构,工字钢

(I32a)沿长边方向布置,间距为1000mm。井底四周支护完成后,人工开挖井底土体,严格控制标高,避免超挖和破坏原状土体。坑底验收完毕后,铺设1层钢筋网片,再安装工字钢,焊接纵向连接筋,井底工字钢格栅与井身格栅连接处必须用螺栓连接牢固,最后铺设钢筋网片。经验收合格后,分层喷射混凝土至设计要求厚度。

5 结语

1) 针对竖井施工作业面狭窄的工况,通过采用旋挖钻机进行引孔作业方法,提前释放围岩地应力,保证竖井开挖掘进时土层的稳定性,采用锚杆、钢架、钢筋网喷射混凝土加固的方法,控制开挖变形,保证围岩变形处于安全范围内。

2) 采用有限元软件对施工过程进行模拟,计算结果表明,随着开挖的进行,下层支护结构较上层支护结构受力不断减小,围岩竖向位移在井口处达到最大值,最大应力出现在竖井底部未开挖中间位置,围岩-支护结构较为稳定,可保证竖井开挖时的安全性。

3) 对有限空间下硬岩地层小截面竖井采用旋挖钻引孔、倒挂井壁法施工,解决了小尺寸空间下硬岩地层竖井施工、城市交通建设中施工场地狭窄、占道影响城市交通等问题,该施工技术可高效、安全完成竖井段施工。

参考文献:

[1] 李建斌.我国掘进机研制现状、问题和展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(6):877-896.

LI J B. The current situation, problems and prospects of the development of tunneling machines in China [J]. Tunnel construction, 2021,41(6):877-896.

[2] 荆国业,韩博,刘志强.全断面竖井掘进机凿井技术[J].煤炭工程,2020,52(10):29-33.

JING G Y, HAN B, LIU Z Q. Full section vertical shaft excavation machine drilling technology [J]. Coal engineering, 2020, 52(10):29-33.

[3] 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(S1):154-157.

DAI X, XU W, ZOU L, et al. Numerical simulation analysis of vertical shaft excavation process [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012,34(S1):154-157.

[4] 郝凤山,段晶晶.开挖地铁对地表建筑物影响研究[J].科学技术与工程,2007,7(10):2437-2439.

HAO F S, DUAN J J. Research on the impact of subway excavation on surface buildings [J]. Science technology and engineering, 2007,7(10):2437-2439.

[5] 蔡海兵,程桦,荣传新,等.复杂条件下深井马头门围岩稳定性分析及支护结构优化[J].采矿与安全工程学报,2015,32(2):298-304.

CAI H B, CHENG H, RONG C X, et al. Stability analysis and

support structure optimization of surrounding rock of deep well horsehead gate under complex conditions[J]. Journal of mining & safety engineering, 2015,32(2):298-304.

[6] 胡志英. 复合式支护技术在大型土质调压井中的研究与应用 [J]. 中国农村水利水电,2014(12):143-144,147.

HU Z Y. Research and application of composite support technology in large soil pressure regulating wells[J]. China rural water and hydropower,2014(12):143-144,147.

[7] 黄耀文. 高地应力强卸荷下大直径旋流竖井施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(7): 33-38.

HUANG Y W. Construction technology of large diameter cyclone shaft under high ground stress and strong unloading [J]. Construction technology,2023, 52(7): 33-38.

[8] 王慧娟,张建海,赵晓锋,等. 出线竖井变形监测反馈及衬砌变形稳定研究 [J]. 地下空间与工程学报,2011,7(6): 1227-1232.

WANG H J, ZHANG J H, ZHAO X F, et al. Research on deformation monitoring feedback and lining deformation stability of the outgoing shaft[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2011,7(6):1227-1232.

[9] 秦政,陈建伟,李功子,等. 复杂环境下竖井掘进与局部爆破开挖组合施工技术研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023, 54(3):105-115.

QIN Z, CHEN J W, LI G Z, et al. Research on the combined construction technology of vertical shaft excavation and local blasting excavation in complex environments[J]. Water resources and hydropower engineering,2023,54(3):105-115.

[10] 刘兵科,贺少辉,贺家新,等. 地铁超深竖井及超小曲率半径隧道施工技术 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1601-1607.

LIU B K, HE S H, HE J X, et al. Construction technology for ultra deep vertical shafts and ultra small curvature radius tunnels in subways [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(4):1601-1607.

[11] 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.

PU Q H, LUO X F, XU L, et al. Simulation analysis of the construction process of deep vertical shafts in weak strata with complex support structures [J]. Yellow River, 2022, 44(3): 144-148,159.

[12] 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.

SU Q. Stability and parameter optimization of vertical shaft excavation under complex geological conditions [J]. Water resources and power, 2018,36(4):123-125.

[13] 周雄华,许圣祥,冷希乔. 深大竖井正井法施工围岩与结构力学特性分析[J]. 现代隧道技术,2019,56(S2):325-331.

ZHOU X H, XU S X, LENG X Q. Analysis of surrounding rock and structural mechanical characteristics of deep and large vertical shaft construction using the vertical shaft method [J]. Modern tunnelling technology, 2019,56(S2):325-331.

[14] 江中勇. 岩质地层地铁隧道风井施工受力及变形规律研究 [J]. 铁道建筑技术,2023(2):10-13,45.

JIANG Z Y. Research on the stress and deformation law of subway tunnel wind shaft construction in rock strata[J]. Railway construction technology, 2023(2):10-13,45.