

复杂地质条件下引水闸门井开挖支护方案数值模拟研究

杨小华^{1*}, 付亚东¹, 代强¹, 郝丽萍¹, 朱博文², 孙超伟³, 缙富⁴

¹中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都

²西安科技大学理学院, 陕西 西安

³西京学院土木工程学院, 陕西 西安

⁴西安黄河规划设计有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月18日

摘要

随着水利施工技术的发展, 深竖井作为一种常见的地下结构, 被广泛应用于调压、引水、通风等水利水电工程中。受恶劣地形和复杂地质的影响, 在大直径且埋深大的竖井施工中, 围岩的稳定性对于施工安全至关重要, 需要对复杂地质深竖井施工过程的围岩和支护所产生的受力变形进行研究分析, 以更好地确保围岩和支护的稳定性。本文以以色列克卡夫-哈亚邓抽水蓄能电站引水闸门井开挖支护结构工程为背景, 采用现场监测和数值模拟结合的方法, 对开挖支护引水闸门井时的支护参数以及施工开挖方案进行了数值模拟研究。通过设计正交试验, 对不同灌注桩长度, 灌注桩直径以及开外进尺三种因素进行参数敏感性分析, 分析了10组不同支护方案下竖井开挖后围岩压力分布情况及其相应稳定性, 发现在选取开挖支护方案为灌注桩直径1 m, 开挖进尺2 m, 灌注桩埋入深度35 m时, 引水闸门井周边围岩及其支护结构的主应力值以及位移最小, 说明该开挖施工方案最为合理, 显著提高复杂地层下深竖井开挖的施工进度及安全, 可为类似工程提供借鉴。

关键词

抽水蓄能电站, 引水闸门井, 有限元, 开挖支护

Numerical Simulation Study of Diversion Gate Well Excavation and Support Scheme under Complex Geological Conditions

Xiaohua Yang^{1*}, Yadong Fu¹, Qiang Dai¹, Liping Hao¹, Bowen Zhu², Chaowei Sun³, Fu Gou⁴

¹Sinohydro Bureau 5 Co. Ltd., Chengdu Sichuan

*第一作者。

文章引用: 杨小华, 付亚东, 代强, 郝丽萍, 朱博文, 孙超伟, 缙富. 复杂地质条件下引水闸门井开挖支护方案数值模拟研究[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1419-1428. DOI: 10.12677/hjce.2025.146152

²School of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi³School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi⁴Xi'an Huanghe Planning and Design Co. Ltd., Xi'an ShaanxiReceived: May 16th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 18th, 2025

Abstract

With the development of water conservancy construction technology, deep shafts, as a common underground structure, are widely used in water conservancy and hydropower projects such as pressure regulation, water diversion, and ventilation. Affected by the harsh terrain and complex geology, the stability of the surrounding rock is very important for the construction safety of the large diameter and buried deep shaft, and it is necessary to study and analyze the stress deformation generated by the surrounding rock and support in the construction process of the complex geological deep shaft, so as to better ensure the stability of the surrounding rock and support. This article is based on the excavation and support structure project of the water intake gate shaft of the Israeli Kaff Hayadun pumped storage power station, using a combination of on-site monitoring and numerical simulation methods, Numerical simulation studies were carried out on the support parameters and construction excavation scheme during the excavation of the supporting diversion gate well. Through the design orthogonal test, the parameter sensitivity analysis of three factors, namely the length of the cast-in-place pile, the diameter of the cast-in-place pile and the footage outside the opening, analyzed the pressure distribution and corresponding stability of the surrounding rock after excavation of the shaft under 10 groups of different support schemes, and found that when the excavation support scheme was selected as the diameter of the cast-in-place pile was 1 m, the excavation footage was 2 m, and the burial depth of the cast-in-place pile was 35 m, the principal stress value and displacement of the surrounding rock and its supporting structure around the diversion gate well were the smallest, indicating that the excavation construction scheme was the most reasonable. It can significantly improve the construction progress and safety of deep shaft excavation under complex strata, which can provide reference for similar projects.

Keywords

Pumped Storage Power Station, Diversion Gate Wells, Finite Elements, Excavation Support

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

近年来, 随着社会经济不断发展, 在日常生活及工业生产中对电力的需求与日俱增, 为缓解能源压力, 国内外许多地区开始兴建水利水电设施[1], 而在水利水电工程施工过程中, 因其独特的地质条件, 大多数水工建筑物常常采用竖井结构, 例如引水系统中的竖井、调压井、闸门井、出线井、通风井及交通井等。近年来, 利用有限元软件对地下结构仿真, 进行数值模拟计算已越来越广泛, 国内外许多学者在地下工程中利用大型有限元分析软件对岩体变形机理、喷锚支护效果等进行了研究。孙强[2]用 ANSYS 软件模拟了软弱土层中竖井开挖过程, 并分析了开挖过程中软弱土体的稳定性。周巾森等[3]运用 MIDAS 软件模拟了某输水隧洞盾构开挖竖井的掘进过程, 分析了盾构接收竖井开挖过程中地下结构的应力和变形规律。曹程明等[4]通过考虑土拱效应对深竖井基坑受力分布的影响, 然后进行了侧壁土压力计算, 最

后基于不同深宽比建立有限元模型,对竖井变形以及侧壁支护结构应力变形进行了研究分析。刘超等[5]用FLAC3D进行数值分析,获得了不同支护参数条件下的支护力学响应特征,结合技术经济要求,选取多项指标,利用层次分析法及主成分分析法组合赋权各评价指标,提出了竖井支护参数综合评价模型。李丰果等[6]依托洞宫山隧道排风竖井工程,采用理想弹塑性材料本构关系及摩尔-库伦屈服准则,建立了三维有限元模型,对围岩受力及变形特征进行了分析,对围岩周边的特征的受力特征和位移分布特征进行了解释。本文依托以色列克卡夫·哈亚邓抽水蓄能电站,结合现场实际地质条件,通过设计正交试验进行参数敏感性分析,运用数值模拟方法对竖井开挖后围岩压力分布情况以及围岩破坏情况进行分析,为最终确定开挖支护设计参数提供依据,并对类似工程提供借鉴。

2. 工程概况

2.1. 项目概况

以色列克卡夫·哈亚邓抽水蓄能电站位于以色列东北部,距以色列特拉维夫港约120 km。总装机340 MW (2×170 MW)。项目为EPC总承包模式,施工位主体由电建国际和通用电气组成的联合体,电建国际为联合体责任方。电建国际负责土建、压力钢管及部分金属结构的设计与施工,通用电气负责闸门及机组的设计与安装。电建国际由五局和华东院负责实施。项目由上水库、输水系统(引水隧洞、闸门井、引水调压井、高压竖井、引水岔管、引水支管)、地下厂房系统工程(进厂交通洞、应急兼电缆洞、主副厂房洞、主变洞、母线洞、排水廊道及各施工支洞)、尾水系统(尾水支管、尾水岔管、尾调通气洞、尾水调压室及尾水调压井、尾水隧洞)、下水库、地面开关站及进场道路组成。水库无地表径流补给,库水采用从北部的加利利湖通到下库附近的水管进行初期蓄水和日常蒸发补给。本工程位于以色列北部靠近约旦河谷,通过沿约旦河西岸的90号高速公路进入工地。

2.2. 地质条件

根据地质测绘及开挖揭露信息,闸门井位于第四系坡积(Q4dl)地层中,下覆基岩为上玄武地层的致密玄武岩。地层从上至下分为:①黏土层、②块石混合土层、③基岩层。层①黏土,褐色-红褐色,干燥,坚硬,含有部分碳酸盐,局部含有1%~3%的细砾和粗砂,厚度12.1 m。层②碎石混合土,成分为砂质板岩、变质砂岩、大理岩,较松散,厚25.2 m。层③下伏基岩岩性为变质砂岩、大理岩、砂质板岩夹含炭质板岩,岩体上部较破碎,完整性差,下伏基岩围岩强度变化大,岩石单轴饱和抗压强度区间为25~80 MPa。闸门井地层主要参数见表1。

Table 1. Parameters of physical and mechanical properties of the formation

表 1. 地层物理力学性能参数

地层	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/(MPa)	泊松比	粘聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)
黏土层	1.8	17.5	0.385	11	17.6
块石混合土层	2.5	125	0.225	180	37
基岩层	2.65	12500	0.35	1050	46.4

3. 有限元计算分析

3.1. 正交试验设计

本文为确定影响因素对引水闸门井支护结构的影响程度,采用正交试验设计进行数值仿真试验方案

设计, 结合相关文献及现场实际工程反馈, 选取灌注桩直径、开挖进尺深度、桩体深度三个影响因素, 每个因素三个水平, 根据因素水平表设计正交试验表如表 2 并在此基础上额外添加一组别 10 (现场实际工况)进行数值建模设计。

Table 2. Orthogonal experimental design
表 2. 正交试验设计

组别	水平组合	桩直径	开挖进尺	桩深
1	A1B1C1	0.8 m	1 m	33 m
2	A2B2C1	1 m	2 m	33 m
3	A3B3C1	1.2 m	3 m	33 m
4	A3B2C2	1.2 m	2 m	35 m
5	A2B1C2	1 m	1 m	35 m
6	A1B3C2	0.8 m	3 m	35 m
7	A1B2C3	0.8 m	2 m	37 m
8	A2B3C3	1 m	3 m	37 m
9	A3B1C3	1.2 m	1 m	37 m
10	A2B2C2	1 m	2 m	35 m

3.2. 模型建立

本文采用法国达索公司开发的通用有限元分析软件 Abaqus。Abaqus 是一套功能强大的工程模拟的有限元软件, 由达索系统(Dassault Systemes)旗下的 SIMULIA 品牌开发。该软件主要用于解决工程结构和材料行为的复杂问题, 具有强大的非线性分析功能。主模型计算选取范围为左右边界距离都取大于引水闸门井开挖洞径三倍的土体长度 50 m。Z 方向选取大于灌注桩埋入深度三倍的土体长度 100 m, 引水闸门井整体有限元分割模型如图 1 所示。引水闸门井模型建立为土体 50 m×50 m×100 m(长×宽×高), 承台为 1.4 m×1 m(宽×高), 灌注桩直径、桩身长度按正交试验设计选定, 有限元模型使用八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R), 桩体及靠近桩孔位置的土体进行网格加密, 总单元数为 70,439, 其中桩体单元数为 4237。

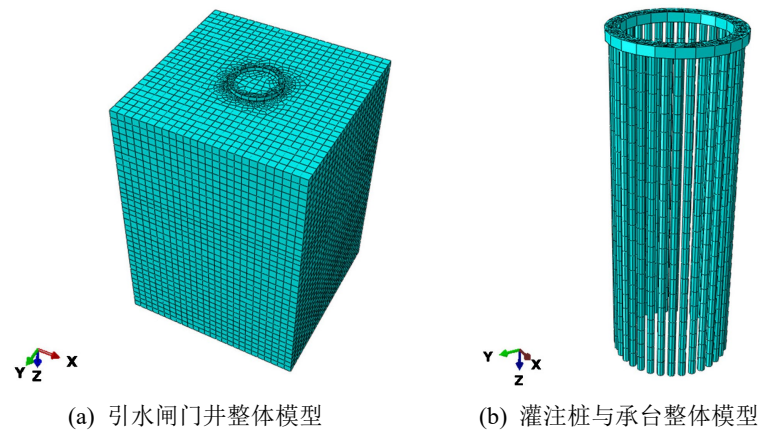


Figure 1. Finite element model
图 1. 有限元模型图

土体物理力学参数选取根据具体的工程地质勘察报告，结合现场实际情况进行综合比较选取。根据具体的计算深度，选择具体的围岩计算参数，土体参数见表 1，土体模型选用摩尔 - 库伦(Mohr-Coulomb, M-C)本构模型。数值模型的本构选用线弹性模型，其物理力学参数材料如表 3 所示，开挖土体选用 M-C 本构模型[7]。

Table 3. Numerical model supporting structure material parameters
表 3. 数值模型支护结构材料参数

组成部分	材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/(MPa)	泊松比
盖梁	B30	2420	3×10^5	0.2
桩体	B40	2440	3.3×10^5	0.2
圈梁	B40	2440	3.3×10^5	0.2
其余部分	B20	2400	2.55×10^5	0.2

开挖土体与桩体、土体与承台之间均采用基于 M-C 准则的接触面模型。刚性较大的桩体和承台设为主体，土体设为从体，接触面设置为“hard” contact，Tangential Behavior 中的 Friction formulation 选择为 Penalty，Friction Coeff 即摩擦系数取 0.4。

3.3. 开挖支护步骤模拟

为真实模拟开挖过程，采用 Abauqs 软件中 Interaction 的 Model Change 来改变土体模拟开挖步骤。在每个开挖计算步，用 Model Change 来改变需要挖去的那部分材料，使其变成空单元，且空单元中的应力被自动的设置为零[8]。开挖具体实现步骤如下：

- 1) 将模型全部赋为弹塑性材料，加上均匀的地应力场，形成初始地应力场。
- 2) 进行地应力反演，消除与初始地应力场相对应的位移场。将初始位移变为零。
- 3) 按原施工方案，将 33 根旋挖灌注桩放入土体模型中，并建立盖梁。
- 4) 按照正交试验设计表，对不同模型进行开挖，对于每步开挖进尺为 1 m 的模型，共进行 34 个开挖计算步。对每步开挖进尺 2 m 的模型，共进行 14 个开挖计算步。对开挖进尺为 3 m 的模型，进行 12 个开挖计算步。并在到达指定深度时，按施工方案添加圈梁，对周围土体起到一定支撑作用。

4. 计算成果与分析

4.1. 围岩及支护结构主应力分析

为了比较引水闸门井围岩在不同因素影响下的应力情况，对使用正交试验设计出的 10 组参数模型计算结果进行比较。图 2、图 3 分别为组别 4，水平组合为 A3B2C2，桩直径 1.2 m，开挖进尺 2 m，桩深 35 m 的引水闸门井数值模型开挖的最大主应力结果和支护结构最大主应力结果。

根据正交试验设计表，进行 10 个组别的引水闸门井数值模型开挖步计算，得到表 4 正交试验设计引水闸门井数值模型开挖围岩最大位移值结果表。

依据正交试验结果，对引水闸门井数值模型围岩及支护结构应力进行极差分析，极差分析可以清晰地揭示各因素之间的主次关系，如图 4，可知，对引水闸门井支护结构稳定性评价指标的影响显著性由大到小依次为灌注桩直径、桩埋入深度、开挖进尺深度。

极差分析结果见表 5。可以看出，通过引水闸门井数值模型，得到的围岩稳定性最佳水平为灌注桩直径为 1 m，开挖进尺 1 m，灌注桩埋入深度为 35 m 的施工方案。

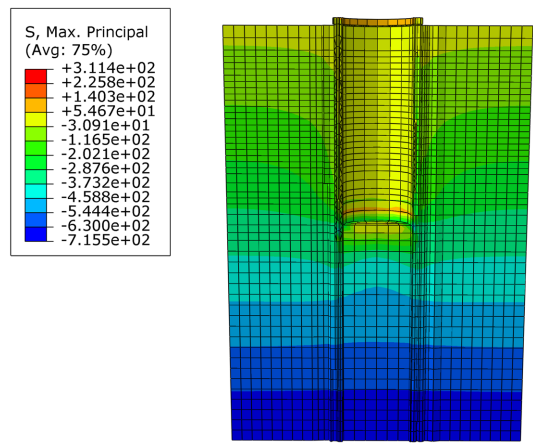


Figure 2. The maximum principal stress of the surrounding rock
图 2. 围岩最大主应力

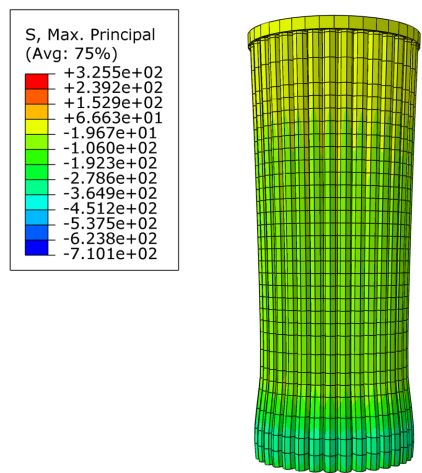


Figure 3. The maximum principal stress of the supporting structure
图 3. 支护结构最大主应力

Table 4. Maximum principal stress results
表 4. 开挖围岩及支护结构最大主应力结果

组别	水平组合	支护结构最大主应力/MPa	围岩最大主应力/MPa
1	A1B1C1	5.844	1.904
2	A2B2C1	4.369	3.169
3	A3B3C1	5.190	8.738
4	A3B2C2	3.255	3.640
5	A2B1C2	2.664	6.960
6	A1B3C2	5.182	3.324
7	A1B2C3	5.988	3.872
8	A2B3C3	3.492	5.425
9	A3B1C3	1.911	4.415
10	A2B2C2	1.665	3.642

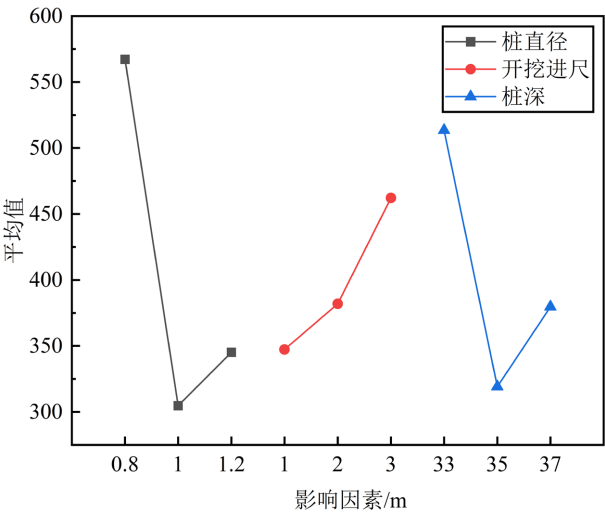


Figure 4. The mean value of the level R of each factor
图 4. 各因素水平对支护结构影响系数 R 均值

Table 5. Extremely poor stress levels of supporting structures
表 5. 支护结构应力极差水平

项	水平	桩直径	开挖进尺	桩深
K 值	0.8	1701.4	-	-
	1	1219	1041.9	-
	1.2	1035.6	-	-
	2	-	1527.7	-
	3	-	1386.4	-
	33	-	-	1540.3
	35	-	-	1276.6
	37	-	-	1139.1
最佳水平		1	2	35

备注：“-”表示没有该水平数据。

4.2. 围岩及支护结构位移分析

为了比较引水闸门井围岩在不同因素影响下的位移情况，对使用正交试验设计出的 10 组参数模型计算结果进行比较。图 5、图 6 分为组别 4，水平组合 A3B2C2，桩直径 1.2 m，开挖进尺 2 m，桩深 35 m 的引水闸门井数值模型和支护结构最大位移结果。

依据正交试验结果，对引水闸门井数值模型围岩及支护结构位移进行极差分析，极差分析可以清晰地揭示各因素之间的主次关系，表 6 为引水闸门井数值模型开挖围岩及支护结构位移结果。

极差分析结果见表 7，可知通过引水闸门井数值模型，得到的围岩稳定性最佳水平为桩直径为 1 m，开挖进尺 2 m，灌注桩桩埋入深度为 35 m 的施工方案。

依据试验结果，如图 7，可知对引水闸门井支护结构稳定性评价指标的影响显著性由大到小依次为灌注桩直径、桩埋入深度、开挖进尺深度。

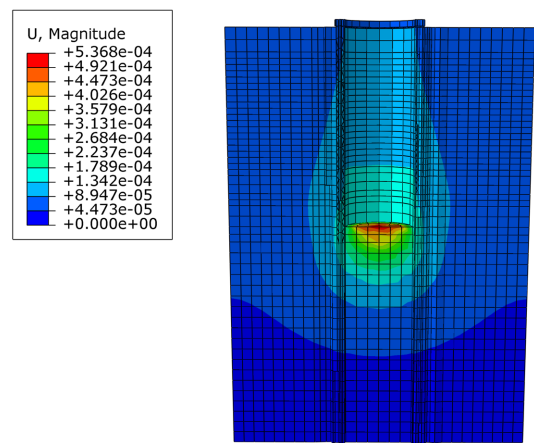


Figure 5. Displacement of surrounding rock
图 5. 围岩位移

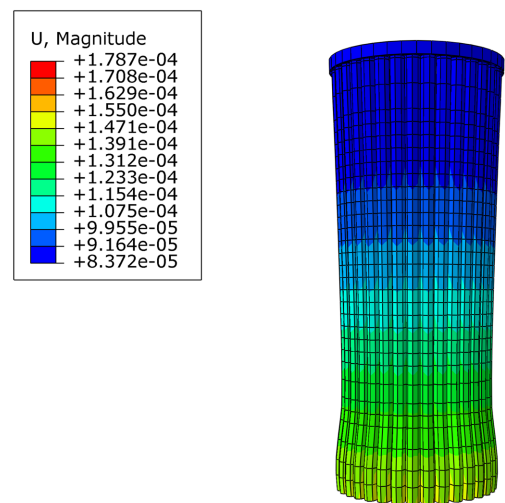


Figure 6. Displacement of the supporting structure
图 6. 支护结构位移

Table 6. Excavation of surrounding rock and displacement results of supporting structures
表 6. 开挖围岩及支护结构位移结果

组别	水平组合	支护结构最大位移/mm	围岩最大位移/mm
1	A1B1C1	21.18	52.38
2	A2B2C1	19.21	53.23
3	A3B3C1	17.93	57.93
4	A3B2C2	17.87	49.67
5	A2B1C2	20.16	50.92
6	A1B3C2	20.33	52.59
7	A1B2C3	19.69	52.14
8	A2B3C3	19.06	51.72
9	A3B1C3	17.37	53.20
10	A2B2C2	19.78	50.47

Table 7. Displacement range level table
表 7. 位移极差水平表

项	水平	桩直径	开挖进尺	桩深
K 值	0.8	18	-	-
	1	18	17	-
	1.2	19	-	-
	2	-	17	-
	3	-	21	-
	33	-	-	25
	35	-	-	13
	37	-	-	17
最佳水平		1	2	35

备注：“-”表示没有该水平数据。

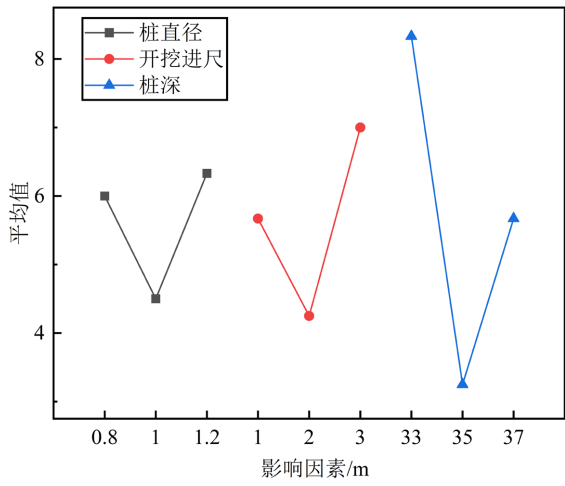


Figure 7. Mean diagram of the influence coefficient R of surrounding rock
图 7. 围岩影响系数 R 均值图

5. 结论

- 1) 引水闸门井周边围岩以及其支护结构的最大主应力和总位移随着开挖深度的增加而变大，虽然位移值是逐渐增大的，但是位移值相较于实际工程的开挖大小来说是偏小的，不会产生较大的变形破坏。
- 2) 当开挖深度较小时，引水闸门井周边围岩以及支护结构主要受到拉应力影响，而随着深度的增加拉应力逐渐消失，围岩所受应力主要为压应力。而支护结构位移随着开挖深度的增加而变大。这一变化趋势与竖井周边围岩的位移的变化一致，当开挖深度较小时，同一高度支护结构的位移并不相同。但随着深度的逐渐增加，支护结构有往开挖处位移的趋势，位移分布呈层状分布。
- 3) 对引水闸门井开挖围岩稳定性评价指标影响最为显著的是桩埋入深度，其次是开挖进尺深度，最后是灌注桩直径。对引水闸门井支护结构稳定性评价指标的影响显著性由大到小依次为灌注桩直径、桩埋入深度、开挖进尺深度。
- 4) 通过正交试验对比分析，结合现场实际工程情况，选取开挖支护方案为灌注桩直径为 1 m，开挖

进尺为 2 m, 灌注桩埋入深度为 35 m 所得的主应力值以及位移值均最小, 说明该实际工程方案最为合理。

参考文献

- [1] Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö. and Ramyar, K. (2013) Freeze-Thaw Resistance and Transport Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Designed by Maximum Density Method. *Cement and Concrete Composites*, **37**, 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009>
- [2] 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.
- [3] 周巾森, 肖明砾, 谢红强, 等. 富水砂层大直径深竖井开挖稳定性有限元分析[J]. 四川水力发电, 2024, 43(1): 116-122.
- [4] 曹程明, 龙照, 时铁磊, 等. 小尺寸深竖井侧壁内力与变形分布规律计算分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 51-56+73.
- [5] 刘超, 祁赞朴, 宋章伦, 等. 基于组合赋权法和响应面法的竖井支护参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 16-20+25.
- [6] 李丰果, 韩亮, 徐矫. 基于数值方法的超深竖井围岩力学特性变化规律研究[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(2): 61-66.
- [7] 宗露丹, 王卫东, 徐中华, 等. 软土地区 56m 超深圆形竖井基坑支护结构力学分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(7): 1248-1256.
- [8] 夏辉. 某矿深竖井施工围岩稳定性及支护技术研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.