

水源山抽水蓄能电站地下厂房地应力特征分析

周益凡¹, 陈安见¹, 张 鸽¹, 马 迪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: 为了分析水源山抽水蓄能电站地下厂房地应力特征, 文章根据抽水蓄能区域地质条件, 构建了区域三维有限元地质模型, 结合水压致裂试验实测地应力数据, 模拟得出水源山抽水蓄能电站工程区地应力场分布规律。结果表明: 最大主应力的分布状态明显受到地形影响, 在沟谷处表现为应力集中现象。厂房附近最大主应力值为 13.8 ~ 18.7 MPa, 厂房附近最小主应力值为 9.9 ~ 13.6 MPa; 工程区域内最大水平主应力值不超过 32.1 MPa。钻孔处模拟计算结果与各钻孔地应力实测结果一致, 模拟得到的最大水平主应力方向近似为 NW 方向, 与实测最大主应力方向吻合, 表明模型计算结果可靠, 可为区域地应力分析和地下厂房开挖提供依据。

关键词: 抽水蓄能电站; 地下厂房; 地应力特征; 有限元模型; 最大主应力

中图分类号: TV743; TV731.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0036-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.11.136

In-situ stress characteristics of the underground powerhouse of Shuiyuan mountain pumped storage power station

ZHOU Yifan¹, CHEN Anjian¹, ZHANG Ge¹, MA Di², CHEN Baoguo²

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

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

Abstract: In order to analyse the in-situ stress characteristics of the underground powerhouse of Shuiyuan mountain pumped storage power station, this paper established a three-dimensional finite element geological model according to the geological conditions of the Pumped Storage Power Station, combined with the measured in-situ stress data by the hydraulic fracturing test, the actual distribution laws of the in-situ stress field in the engineering area of Shuiyuan Mountain Pumped Storage Power Station were obtained. The research results show that: the maximum principal stress distribution state is obviously affected by the topography, the stress concentration phenomenon is manifested at the gully. The maximum principal stress value near the powerhouse ranges from 13.8 MPa to 18.7 MPa, while the minimum principal stress value near the powerhouse ranges from 9.9 MPa to 13.6 MPa. It is also show that the maximum horizontal principal stress value in the project area does not exceed 32.1 MPa. The simulation results of boreholes are in good agreement with the measured results of in-situ stress of each borehole, and the maximum horizontal principal stress direction obtained in the simulation is the NW direction, which is basically in agreement with the measured direction of the maximum principal stress. Those indicate that the results of the simulation results are reliable and can provide a basis for regional in-situ stress analysis and underground powerhouse excavation.

Key words: pumped storage power station; underground powerhouse; in-situ stress characteristic; finite element model; maximum principal stress

收稿日期: 2025-01-14

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(SYS-KY-002)

作者简介: 周益凡(1981—), 男, 高级工程师, 从事水利水电工程技术工作。

通信作者: 马 迪(2000—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的科研和施工技术研究。

地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力, 是进行围岩稳定性分析, 实现岩石工程开挖设计的必要前提^[1]。抽水蓄能电站工程区域地形起伏, 高差大, 地应力分布受地形影响明显^[2], 有必要开展原位地应力测量, 结合数值模拟计算, 获取重要工程部位的地应力状态, 用以有效表征工程区地应力场实际分布规律^[3]。

目前国内外学者采用数值模拟方法, 结合地应力实测数据, 分析工程区地应力场分布规律。韩晓玉等^[4]根据地应力测量结果结合地应力场反演, 分析了高水头抽水蓄能电站地形特征和地应力特点, 获取了三维地应力场的分布规律。郑炜烽等^[5]建立了抽水蓄能电站地下厂房三维数值模型, 结合钻孔实测结果, 通过多元线性回归分析实现了地应力场的反演重构。赵雨等^[6]采用多元线性回归方法分析了某抽水蓄能电站地下厂房地应力分布及演化特征。任斌等^[7]以河南五岳抽水蓄能电站地下厂房洞室群为背景, 采用 FLAC^{3D} 建立地质模型, 结合 BSA-BP 神经网络, 反演计算了该工程区的初始地应力场。ZHANG 等^[8]基于双江口水电站地下电厂, 考虑了深度和地形对初始应力场分布的影响, 使用多元回归方法对地应力进行回溯分析, 得到了发电厂区的地应力函数和地应力变化模式。ZHANG 等^[9]基于地质条件、实测地应力数据, 应用多元回归方法, 研究了大岗山水电站地下厂房地应力场分布特征。

基于上述研究, 本文根据水源山抽水蓄能电站地下厂房区域地质条件, 建立三维有限元模型, 结合实测地应力数据, 分析水源山抽水蓄能电站工程区地应力场实际分布规律, 以期为区域地应力分析和地下厂房的开挖提供参考依据。

1 工程问题分析

1.1 工程概况

广东云浮水源山抽水蓄能电站位于广东省云浮市新兴县太平镇水浪村。电站由上水库、下水库、输水系统建筑物、地下厂房洞室群、开关站及场内道路等组成。地面高程为 180 ~ 1 137 m, 上、下库地形高差约为 560 m, 为中低山丘陵地貌, 地势呈南高北低。工程区内以剥蚀、冲蚀作

用为主, 沟谷发育, 主要呈 NW 向、NNE 向, 受沟谷切割影响, 地形地貌比较复杂。厂房洞室群布置在山脊北坡, 轴线方向为 N75°W, 地表高程为 575 ~ 685 m, 埋深为 375 ~ 395 m。厂房埋藏于花岗岩组成的山体之中, 地形完整, 山坡较缓, 植被发育。

1.2 地层岩性

区域岩性单一, 为燕山期三期花岗岩[$\gamma 52(3)$], 地表分布有第四系坡积层(Qdl)。

(1) 第四系坡积层(Qdl): 分布在山顶及山坡表, 主要为砂质黏土、碎石土, 土质不均, 厚度为 2 ~ 10 m。

(2) 燕山三期花岗岩($\gamma 52(3)$): 广泛分布于整个输水发电系统, 岩性为中粒斑状黑云母花岗岩, 局部夹中粒黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母花岗岩。岩石风化较深, 地表主要出露较厚的全风化岩, 弱风化岩只在沟谷底和陡壁出露。

1.3 岩体力学特性分析

在地下厂房的地质探洞内开展了岩体力学试验, 主要针对中粗粒斑状黑云母花岗岩、岩体裂隙密集带和断层带, 进行了岩体变形试验、岩体和结构面直剪试验, 以获得地下厂房洞室围岩物理力学特征。通过对试验资料进行整理分析, 得出试验成果, 较全面反映了地下厂房及隧洞岩体的变形和强度特性, 具有地质代表性。本工程地下厂房及隧洞岩体变形模量、弹性模量、岩体和结构面抗剪强度参数如表 1 所示。

2 水压致裂原位地应力分析

2.1 水压致裂试验

目前国内外研究者测量地应力的方法很多^[10], 其中水压致裂法^[11]测试精度高、应用最广泛。水压致裂法的优点: 1) 不需要知道岩石力学参数及性质就可测量原位岩体地应力值; 2) 测量深度可以达到数千米, 且测量精度较高; 3) 测量仪器能够承受较大的压力。

采用水压致裂法分别对云浮水源山抽水蓄能电站工程区内钻孔 ZKD001(孔口高程 394.8 m) 和 ZKD005(孔口高程 394.52 m) 开展现场地应力测试, 以获取工程区实测地应力数据, 钻孔布置位

表 1 地下厂房及隧洞岩体力学参数

岩性	岩体级别/结构面类型	试验条件	变形模量/GPa	弹性模量/GPa	抗剪强度/MPa	黏聚力/MPa
中粗粒斑状黑云母花岗岩、微风化、完整	II	泡水	20.0 ~ 25.0	25.0 ~ 30.0	1.50 ~ 1.70	1.20 ~ 1.50
中粗粒斑状黑云母花岗岩、微风化、完整	II	天然	30.0 ~ 35.0	35.0 ~ 40.0	—	—
中粗粒斑状黑云母花岗岩、中风化、完整 ~ 较完整	III	泡水	10.0 ~ 13.0	15.0 ~ 18.0	1.00 ~ 1.30	0.80 ~ 1.00
中粗粒斑状黑云母花岗岩裂隙密集带、中风化、较破碎	III	天然	9.00 ~ 12.0	13.0 ~ 15.0	0.70 ~ 0.80	0.25 ~ 0.35
中粗粒斑状黑云母花岗岩裂隙密集带、中风化、较破碎	胶结结构面	泡水	—	—	0.65 ~ 0.75	0.10 ~ 0.20

置如图 1。

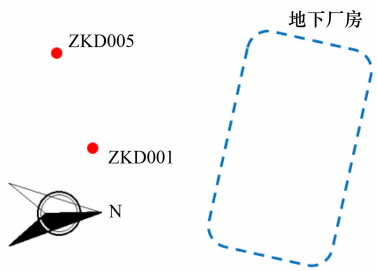


图 1 钻孔布置

2.2 地应力试验结果分析

(1) ZKD001 钻孔地应力测量结果。采用压裂数据处理方法,对 ZKD001 钻孔水压致裂测试数据进行计算分析,在此基础上计算主要压裂参数和主应力值,计算结果如表 2 所示。

ZKD001 钻孔大主应力、小主应力、垂向应力随钻孔孔深分布如图 2 所示。

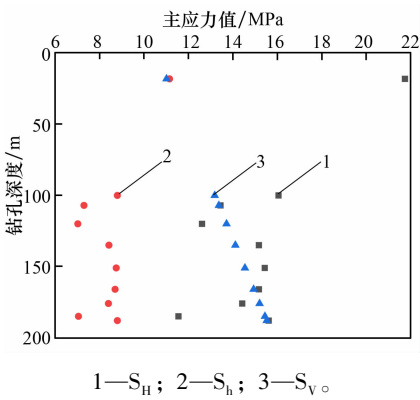


图 2 ZKD001 钻孔地应力值随钻孔深度分布特征

结合表 2 和图 2 可以看出,在孔深 18.20 ~ 188.20 m 测量深度范围内,最大水平主应力的量值为 11.56 ~ 21.75 MPa,最小水平主应力的量值介于 7.03 ~ 11.16 MPa 之间。孔深 18.20 m 测段应力值明显高于其它测段值,初步分析该测段处

表 2 ZKD001 钻孔地应力测量结果

测段序号	测段中心深度/m	压裂参数/MPa						主应力值/MPa			$S_H/(^{\circ})$
		P_H	P_0	P_b	P_r	P_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	18.20	0.18	0.18	16.82	11.55	11.16	5.27	21.75	11.16	11.02	
2	100.20	1.00	1.00	18.01	9.37	8.81	8.64	16.06	8.81	13.19	NW35°
3	107.20	1.07	1.07	16.26	7.41	7.31	8.85	13.45	7.31	13.38	
4	120.20	1.20	1.20	11.55	7.27	7.03	4.28	12.62	7.03	13.72	NW38°
5	135.20	1.35	1.35	12.20	8.76	8.43	3.44	15.18	8.43	14.12	NW18°
6	151.20	1.51	1.51	16.05	9.33	8.76	6.72	15.44	8.76	14.55	NW15°
7	166.20	1.66	1.66	15.12	9.29	8.71	5.83	15.18	8.71	14.94	
8	176.20	1.76	1.76	13.66	9.04	8.41	4.62	14.43	8.41	15.21	
9	185.20	1.85	1.85	9.98	7.77	7.06	2.21	11.56	7.06	15.45	
10	188.20	1.88	1.88	14.55	8.93	8.81	5.62	15.62	8.81	15.53	

注: P_H 为静水柱压力; P_0 为孔隙压力; P_b 为岩石原地破裂压力; P_r 为重张压力; P_s 为瞬时关闭压力; T 为岩体原位抗拉强度; S_H 为最大水平主应力; S_h 为最小水平主应力; S_v 为根据上覆岩层重量计算的垂向主应力(岩石密度暂取 2.65 g/cm³)

于硐室附近, 其应力状态可能受硐室开挖影响产生某种程度的应力集中导致。此外, 对该孔获取的 10 个测段测试曲线进行分析还可以发现, 孔深 166.20 m 深的 4 个测段在停止泵进后压力衰减迅速, 表明对应测段岩体完整性较差, 在其附近可能存在具有一定连通性的原生裂隙, 相应地, 得到的应力值也较低。在测试深度范围内, 3 个主应力之间的关系为总体表现为 $S_H > S_v > S_h$, 按照 Anderson 断层理论揭示的断裂性质与应力状态之间的关系, ZKD001 钻孔附近应力场以水平主应力作用为主, 应力结构有利于走向滑动断层活动, 为走滑断层应力环境。

10 个测段岩石的原位抗拉强度值介于 2.21 ~ 8.85 MPa 之间, 其平均值为 5.55 MPa。

(2) ZKD005 钻孔地应力测量结果

采用压裂数据处理方法对 ZKD005 钻孔水压致裂测试数据进行计算分析, 得出 ZKD005 钻孔水压致裂地应力测量压裂参数和主应力计算结果如表 3 所示。

ZKD005 钻孔大主应力、小主应力、垂向应力随钻孔深度分布如图 3 所示。

结合表 3 和图 3 可以看出, 在孔深 52.10 ~ 185.00 m 测量深度范围内, 最大水平主应力的量值介于 12.47 ~ 18.04 MPa 之间, 最小水平主应力的量值介于 7.21 ~ 10.06 MPa 之间。在测试深度范围内, 3 个主应力之间的关系表现为 $S_H > S_v >$

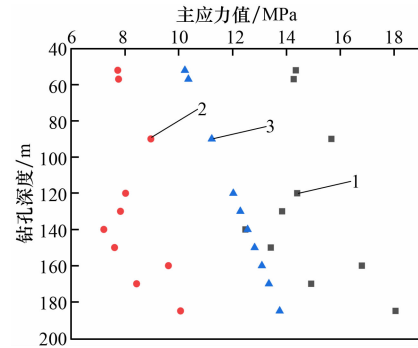


图 3 ZKD005 钻孔地应力值随钻孔深度分布特征

S_h , 按照 Anderson 断层理论揭示的断裂性质与应力状态之间的关系, ZKD005 钻孔附近应力场以水平主应力作用为主, 应力结构有利于走滑断层活动, 为走滑断层应力环境。

10 个测段岩石的原位抗拉强度值介于 2.03 ~ 8.26 MPa 之间, 其平均值为 5.93 MPa, 略高于 ZKD001 钻孔 10 个测段的平均值(5.55 MPa)。

3 地应力场数值模型

3.1 地质模型

采用有限元软件 Midas GTS NX 进行水源山抽水蓄能电站地下厂房地应力模拟, 建立工程区地质模型。考虑工程区域的地理位置和地形特征, 模型以地下厂房为中心, 长度方向约为 2.3 km, 宽度约 1.2 km; 高度约为 1.7 km, 地表面为自由面。

根据现场高程数据网, 采用 GTS NX 地形数据生成器生成地形曲面, 地表地形曲面如图 4 所示。

表 3 ZKD005 钻孔地应力测量结果

测段 序号	测段中心 深度/m	压裂参数/MPa						主应力值/MPa			$S_H/(^\circ)$
		P_H	P_0	P_b	P_r	P_s	T	S_H	S_h	S_v	
1	52.10	0.52	0.52	16.05	8.33	7.73	7.72	14.34	7.73	10.22	
2	57.00	0.57	0.57	16.31	8.45	7.76	7.86	14.26	7.76	10.35	NW35
3	90.00	0.90	0.90	18.28	10.32	8.96	7.96	15.66	8.96	11.22	
4	120.00	1.20	1.20	13.73	8.47	8.02	5.26	14.39	8.02	12.02	
5	130.00	1.30	1.30	13.29	8.36	7.83	4.93	13.83	7.83	12.28	NW18
6	140.00	1.40	1.40	16.02	7.76	7.21	8.26	12.47	7.21	12.55	
7	150.00	1.50	1.50	12.56	7.92	7.61	4.64	13.41	7.61	12.81	
8	160.00	1.60	1.60	14.21	10.44	9.61	3.77	16.79	9.61	13.08	
9	170.00	1.70	1.70	10.71	8.68	8.43	2.03	14.91	8.43	13.34	
10	185.00	1.85	1.85	17.13	10.29	10.06	6.84	18.04	10.06	13.74	

注: P_H 为静水柱压力; P_0 为孔隙压力; P_b 为岩石原地破裂压力; P_r 为重张压力; P_s 为瞬时关闭压力; T 为岩体原位抗拉强度; S_H 为最大水平主应力; S_h 为最小水平主应力; S_v 为根据上覆岩层重量计算的垂向主应力(岩石密度暂取 2.65 g/cm³)

按照地表高程和模型范围高度向下拉伸,建立工程区几何模型,并进行网格划分,如图 5 所示。

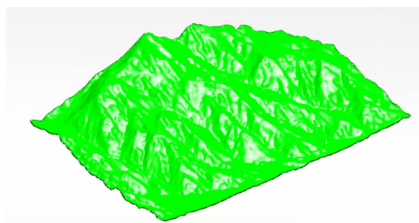


图 4 地表地形曲面

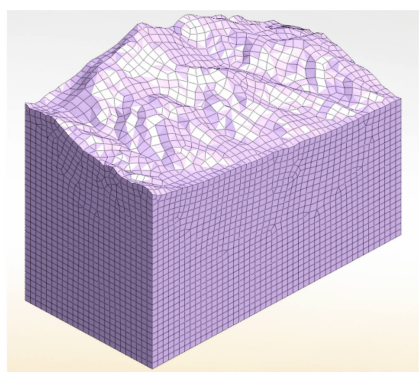


图 5 工程区有限元模型网格

3.2 地层物理力学参数与边界荷载

工程区岩体力学参数按照表 1 中的天然状态下的岩体力学参数取平均值,泊松比取 0.25,密度取 2.8 g/cm^3 。

水源山抽水蓄能电站地下厂房地应力模拟分为两步进行:1) 进行工程区自重应力场模拟;2) 施加挤压力,进行工程区构造应力场模拟。以自重应力和构造应力的叠加作为工程区的地应力。

模型计算分为 3 个工况:1) 自重应力;2) X 向挤压;3) Y 向挤压,具体过程如表 4 所示。

表 4 计算工况及边界条件

工况	边界条件、荷载施加
自重工况	约束模型四周和底部法向位移,上表面自由,施加重力
X 向挤压	约束模型底部、 Y 方向及 X 负向法向位移, X 正向施加挤压荷载
Y 向挤压	约束模型底部、 X 方向及 Y 负向法向位移, Y 正向施加挤压荷载

模型边界约束条件,以及荷载施加示意图如图 6 所示。以 ZKD001 和 ZKD005 钻孔测量结果为根据,确定了荷载的作用方式及量值,在此基础上计算分析工程区域地应力分布特征。

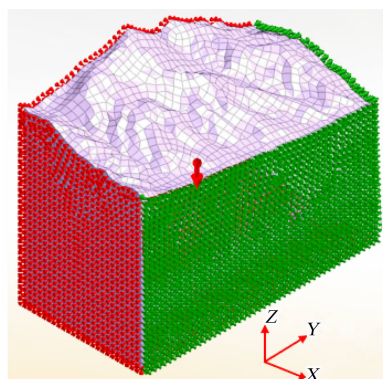


图 6 边界荷载施加

4 地应力场数值模拟结果分析

4.1 工程区自重应力场

工程区自重应力场分布云图如图 7 所示。自重应力随着深度的分布具有明显的分层特性,且随着深度的增加而增大,自重应力的大小近似等于上覆岩层的重量。

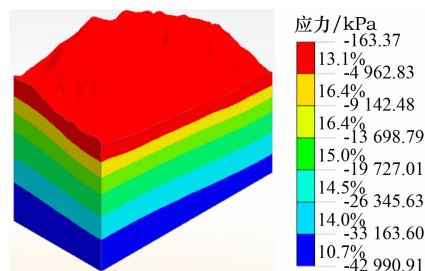


图 7 工程区自重应力场分布云图

4.2 工程区域最大主应力分布规律

图 8 为模型计算工程区域最大主应力分布云图,最大主应力随着深度增加而增大,工程区地应力分布受地形影响明显,沟谷处存在应力集中现象。从图 9 中看出,厂房洞室群埋深(200 m 高程)位置处,即最大钻孔深度位置处对应水平面大主应力值约为 $13.8 \sim 18.7 \text{ MPa}$,与 ZKD001 钻孔测量结果 (15.62 MPa)、ZKD005 钻孔测量结果 (18.04 MPa) 基本接近。

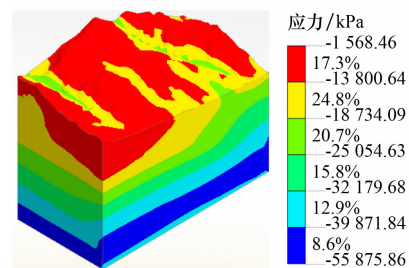


图 8 最大主应力分布云图

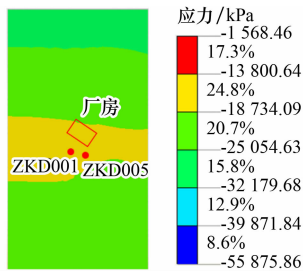


图9 厂房洞室群埋深位置处大主应力分布云图

4.3 区域中间主应力分布

图10为模型计算区域中间主应力分布云图。从图11中看出, 厂房洞室群埋深(200 m 高程)位置处, 即最大钻孔深度位置处对应水平面中间主应力值约为 15.7 MPa。

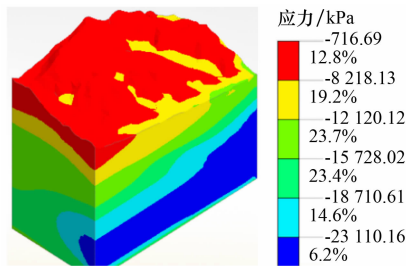


图10 中间主应力分布云图

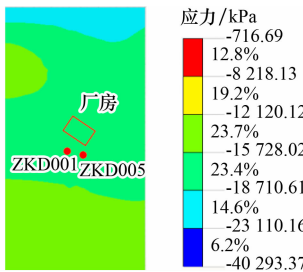


图11 厂房洞室群埋深位置处中间主应力分布云图

4.4 区域最小主应力分布

图12为模型计算区域最小主应力分布云图, 图13为厂房附近岩体最小主应力分布云图。厂房洞室群埋深(200 m 高程)位置处, 即最大钻孔深度位置处对应水平面小主应力值约为 9.9 ~ 13.6 MPa, 与 ZKD001 钻孔测量结果(8.81 MPa)、ZKD005 钻孔测量结果(10.06 MPa)基本接近。

4.5 地应力实测值与模拟结果对比

钻孔 ZKD001 地应力实际测量结果与数值模拟结果对比如图14所示。不同测段深度对应的地应力实测值与模拟值基本吻合, 说明数值模型计算结果较合理。

钻孔 ZKD005 地应力实际测量结果与数值模拟结果对比如图15所示。不同测段深度对应的地

应力实测值与模拟结果变化规律一致, 且数值接近, 说明数值模型计算结果较准确可靠。

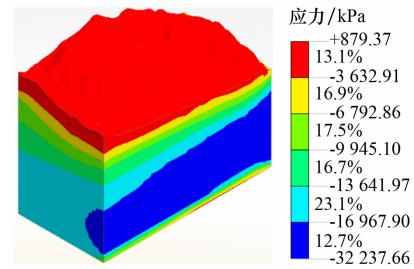


图12 最小主应力分布云图

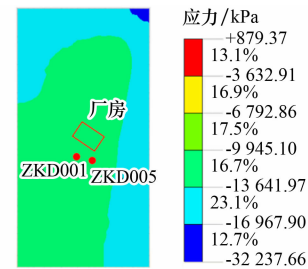
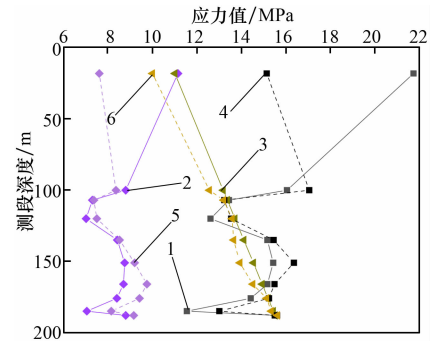
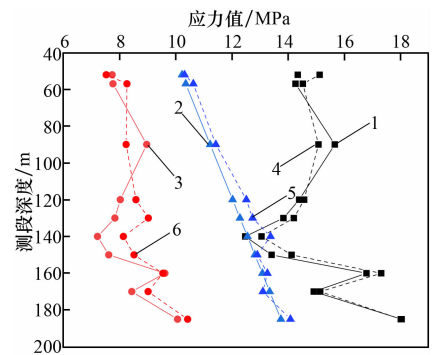


图13 厂房洞室群埋深位置处小主应力分布云图



实测值: 1—SH; 2—Sh; 3—Sv;
模拟值: 4—SH; 5—Sh; 6—Sv。

图14 钻孔 ZKD001 地应力实测值与模拟值



实测值: 1—SH; 2—Sh; 3—Sv;
模拟值: 4—SH; 5—Sh; 6—Sv。

图15 ZKD005 地应力实测值与模拟值对比

4.6 主应力方向

地下厂房埋深位置处水平最大主应力方向云

图如图 16 所示。ZKD001 实测最大水平主应力方向为 $N27^{\circ}W$ ，模拟得到的最大水平主应力方向为 NW 方向，实测最大水平主应力方向与模拟得到的最大水平主应力方向基本吻合。ZKD005 实测最大水平主应力方向为 $N27^{\circ}W$ ，模拟得到的最大水平主应力方向近似为 NW 方向，实测最大水平主应力方向与模拟得到的最大水平主应力方向基本吻合。

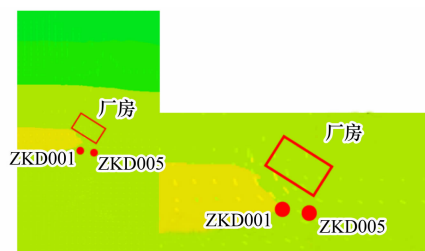


图 16 最大主应力方向

5 结论与建议

(1) ZKD001 钻孔和 ZKD005 钻孔测量深度范围内的实测地应力，最大水平主应力的量值为 $11.56 \sim 21.75 \text{ MPa}$ ，最小水平主应力为 $7.03 \sim 11.16 \text{ MPa}$ 。钻孔附近三向应力状态总体表现为 $S_H > S_v > S_h$ ，水平主应力占主导作用，最大主应力方向为 $NW15^{\circ} \sim NW38^{\circ}$ ，优势方位为 $NNW \sim NW$ ，与区域应力场方向基本一致。模拟计算结果与各钻孔地应力实测结果一致。

(2) 模拟得出的地应力场分布规律表明，应力分布状态明显受地形影响，在沟谷处表现为较为明显的应力集中现象。地下厂房附近测孔最大埋深处（约 200 m 高程面），最大主应力值为 $13.8 \sim 18.7 \text{ MPa}$ ，工程区内最大水平主应力值不超过 32.10 MPa ；厂房附近最小主应力值为 $9.9 \sim 13.6 \text{ MPa}$ 。最大水平主应力方向为 NW 方向，与实测最大水平主应力方向基本吻合。

(3) 基于水源山区域地质条件和水压致裂三维地应力测量结果，构建区域三维有限元地质模型得出了大高差地形电站工程区地应力场分布规律，为地下厂房洞室群开挖、支护设计，防止走

滑断层活动的影响提供了依据。

参考文献：

- [1] 李永松,尹健民,艾凯,等. 深圳抽水蓄能电站地应力测试分析及其在地下洞室设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报. 2006(增刊2):3965-3970.
- [2] 刘忠富,刘天鹏,蔡洪亮,等. 蒲石河抽水蓄能电站地下厂房三维初始应力场反演分析[J]. 岩土力学. 2008,29(增刊1):181-184.
- [3] LI Y, YIN J, AI K, et al. Measurement and analysis of geostress for underground engineering design of Shenzhen pumped storage plant [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2006,25(增刊2):3965-3970.
- [4] 韩晓玉,郑炜烽,董志宏,等. 高水头抽水蓄能电站地应力综合测试及抗劈裂分析[J]. 岩土力学. 2024, 45(7):2167-2174.
- [5] 郑炜烽,王乐华,罗笙,等. 抽水蓄能电站大型地下厂房区初始应力场反演[J]. 水电能源科学. 2023, 41(11):143-147.
- [6] 赵雨,白金朋. 基于 FLAC3D 的多元线性回归法地下厂房初始地应力场反演重构[J]. 水电能源科学. 2022,40(3):149-152.
- [7] 任斌,张帆,李永生,等. 五岳抽水蓄能电站地下厂房初始地应力反演及围岩稳定性分析[J]. 水电能源科学. 2023,41(5):117-120.
- [8] ZHANG Q, XIANG W, YU X, et al. Back analysis of initial geostress field for underground powerhouse zone of Shuangjiangkou hydropower station[J]. China Civil Engineering Journal. 2015,48(8):86-95.
- [9] ZHANG Y, WEI Q, SHENG Q, et al. Three dimensional back analysis of geostress field in underground powerhouse zone of Dagangshan hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics. 2011,32(5):1523-1530.
- [10] LIU N, ZHANG C S. Back regression analysis on initial geostress field of Wendeng Pumped storage power station [Z]. 5th International Symposium on In-Situ Rock Stress;2010,545-548.
- [11] 刘允芳,韩晓玉,刘元坤. 深圳抽水蓄能电站水压致裂法三维地应力测量和分析[J]. 岩土力学. 2006, 27(增刊2):1205-1210.