

引用格式: 李征征, 杨文超, 张鹏, 等, 2023. 藏东南某大型水电站工程区地应力状态及反演分析 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 442-452.
DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232912](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232912)

Citation: LI Z Z, YANG W C, ZHANG P, et al., 2023. In-situ stress measurement and inversion analysis of a large hydropower project in southeast Tibet [J].
Journal of Geomechanics, 29 (3): 442-452. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232912](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232912)

藏东南某大型水电站工程区地应力状态及反演分析

李征征¹, 杨文超¹, 张鹏², 李常虎¹, 范玉璐²

LI Zhengzheng¹, YANG Wenchao¹, ZHANG Peng², LI Changhu¹, FAN Yulu²

1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
1. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shanxi, China;
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

In-situ stress measurement and inversion analysis of a large hydropower project in southeast Tibet

Abstract: As a control and regulating project, the hydropower station in the Yigongzangbu basin of Tibet plays a vital role in meeting the electricity demand of the Tibetan power grid. Identifying this hydropower station's present-day in-situ stress environment and understanding the characteristics of in-situ stress distribution at critical locations such as underground plants and diversion tunnels are essential to ensure its engineering safety. Based on the tectonic and geological background and rock conditions of the project area, we carried out hydraulic fracturing in-situ stress measurements by placing boreholes and obtained in-situ stress data from 4 measurement points (8 boreholes). A finite element three-dimensional geological model was established according to the existing geological conditions. The measured stress state revealed the loading conditions, and the inverse analysis of the stress field in the engineering area was made. The maximum horizontal principal stress ranges from 4.17 to 16.93 MPa in the 2D test and 14.2 to 16.23 MPa in the 3D test. The maximum horizontal principal stress orientation is NE 38° to NE 47°, and the NE direction dominates the present-day tectonic stress field. In the 2995-meter elevation horizontal plane of the underground plant area of the power station, the stress values of σ_1 , σ_2 , and σ_3 range from 11.70 to 12.12 MPa, 9.81 to 10.74 MPa, and 5.22 to 6.85 MPa, respectively. The maximum principal stress value of σ_1 , σ_2 , and σ_3 along the diversion tunnel range from 11.8 to 14.05 MPa, 10.13 to 12.83 MPa, and 4.56 to 8.49 MPa, respectively. The axis direction of this hydropower station's underground plant and the diversion tunnel's axis direction intersect at a slight angle with the direction of the measured maximum principal stress, and the ground stress field is favorable to the stability of the project cavern. It is necessary to consider the actual geological conditions and adopt suitable tunnel construction technology in the later construction process. The construction monitoring should also be strengthened to ensure the project's safe construction.

Keywords: southeast Tibet; hydropower station; hydraulic fracturing; in-situ stress measurement; inverse analysis of in-situ stress; engineering stability

摘 要: 某水电站作为西藏易贡藏布流域的控制性调节工程, 对满足西藏电网的用电需求发挥重要作用。为查明该水电站现今地应力环境, 掌握地下厂房、引水隧洞等关键位置地应力分布特征, 保障其工程安全, 文章综合考虑工程区构造地质背景、岩体条件等, 通过布设钻孔开展水压致裂法地应力测量工作, 获得 4 个测点 (8 个孔) 的地应力数据; 依据现有地质条件, 建立有限元三维地质模型; 通过测得的应力状态, 获得加载条件, 进行工程区应力场反演分析。结果表明: 二维地应力测试结果显示最大水平主应力为 4.17~16.93 MPa, 三维地应力测试结果显示最大主应力为 14.20~16.23 MPa, 最大水平主应力方

第一作者: 李征征 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水电工程地质勘察工作。E-mail: lizhengzh@nwh.cn

通讯作者: 张鹏 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地应力测量与监测工作。E-mail: zhangpeng0713@163.com

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-05-18; 责任编辑: 王婧

位为 NE 38°~NE 47°, 现今构造应力场以北东向为主导; 电站地下厂房区域 2995 m 高程水平面最大主应力 σ_1 应力值为 11.70~12.12 MPa, 中间主应力 σ_2 应力值为 9.81~10.74 MPa, 最小主应力 σ_3 应力值为 5.22~6.85 MPa; 引水隧洞沿线最大主应力值 σ_1 为 11.8~14.05 MPa, 中间主应力值 σ_2 为 10.13~12.83 MPa, 最小主应力值 σ_3 为 4.56~8.49 MPa; 该水电站地下厂房轴线方向和引水隧洞轴线方向与实测最大主应力方向呈小角度相交, 地应力场对工程洞室的稳定性有利。后期施工过程中应综合考虑实际地质情况, 采用适宜的隧洞施工技术并加强施工监测, 从而确保工程安全建设。

关键词: 藏东南; 水电站; 水压致裂法; 地应力测量; 应力场反演分析; 工程稳定性

中图分类号: TV221; P315.72+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0442-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232912

0 引言

岩体内的初始应力场是影响地下工程围岩变形及破坏形式的主要因素, 是水电工程地下厂房、引水隧洞等地下建筑物工程稳定性分析和设计的重要参量(李四光, 1973; 刘允芳, 2000)。地应力值的大小和方向对洞室的稳定性影响比较复杂, 其影响因素主要有应力大小、最大主应力与洞室轴线的夹角、洞室横断面内的差应力等(肖本职, 2008), 因此准确查明工程区内的初始应力场分布规律至关重要。现场实测是了解应力场最直接、最准确的途径, 但地应力测试工作耗时耗力, 同时还受到现场交通、场地地形、工程投资和工期的制约, 故无法进行大批量的测量。为了全面了解工程区的地应力分布特征, 利用数值模拟技术, 结合少量的实测数据, 对整个工程区进行应力场反演分析, 是获取大范围应力场分布规律的有效手段(肖蕾等, 2019; 樊启祥等, 2020; 程王润等, 2021), 可为大型水电站地下洞室群布置和开挖施工, 以及围岩稳定性支护参数确定提供可靠的技术资料(韩斌等, 2022)。这种从局部“点”到宏观“面”的分析方法, 在国内外水电、矿山等项目中获得大量的工程实践应用。付成华等(2006)根据溪洛渡水电站坝址区实测地应力对工程区初始应力场进行了反演分析研究; 袁风波等(2007)对拉西瓦水电站工程河谷区地应力进行反演分析, 得出地应力场的空间分布特征和规律; 谢红强等(2008)对锦屏水电站坝址区进行了初始地应力场回归反演分析, 为工程高边坡的开挖支护和地下厂房的稳定分析提供应力场参数; 张延新等(2010)对万福煤矿进行了地应力测试和有限元分析; 周勇等(2018)对杨房沟水电站深切河谷地应力场进行反演分析; Ren et al.(2021)针对冀北某隧道

实测地应力数据偏少的问题, 采用三维有限差分法反演分析了整个工程区域的地应力场; Wang et al.(2016)对西藏邦铺矿区开展了地应力测试和应力场有限元分析。因此, 水压致裂法地应力测量与应力场反演分析技术在国内外地下工程设计施工与安全运行过程中发挥了重要作用。

文章研究的水电站位于西藏自治区那曲市嘉黎县境内的易贡藏布干流, 发源于嘉黎县西北面念青唐古拉山脉南麓, 流至通麦汇入帕隆藏布。其干流全长 286 km, 流域面积 13559 km², 河口处年平均流量 461 m³/s, 多年平均年径流量 145.1×10⁸m³, 天然落差 3070 m, 蕴含极其丰富的水力资源。该水电站枢纽建筑物由混凝土双曲拱坝、泄洪消能建筑物和引水发电建筑物三大系统组成, 其中双曲拱坝最大坝高为 270.0 m, 水电站拟建总装机容量 1020.0 MW, 最大库容 11.55×10⁸m³, 具有区域构造条件复杂、初拟坝高较高、地下厂房埋深大等特点, 施工难度较大, 地质安全问题突出。

受印度洋板块向欧亚大陆板块俯冲挤压作用影响(England and Molnar, 1997; 王二七等, 2001), 西藏地区区域构造活动强烈(Harrison et al., 1992; Molnar et al., 1993; Royden et al., 1997; Tapponnier et al., 2001), 高地应力诱发的应力型破坏、强烈岩爆和软岩大变形问题极为突出(侯靖等, 2019)。工程区位于西藏东南部, 区域构造活动强烈, 应力场复杂多变, 地层岩性以硬质花岗岩为主, 同时为深切峡谷地形, 以上条件均有利于孕育高地应力条件, 为了保障水电站工程顺利安全建设, 需查明工程区现今应力场特征。为此, 在工程区开展水压致裂地应力测量工作, 利用有限元软件建立三维地质模型, 基于实测地应力结果开展工程区现今应力场特征研究, 同时重点关注地下厂房和引水隧洞沿线应力场特征。上述研究成果可为该水电站工程规划设计

提供数据支撑,丰富藏东南地区地应力实测资料,对周边类似工程建设具有一定的参考价值。

1 工程地质概况

该水电站工程及其邻区地处青藏高原强烈隆起区的西北部,是构造运动、地震活动、地热活动和新生代岩浆作用强烈的地区,在大地构造上位于冈瓦拉古陆的冈底斯-腾冲微陆块,喜马拉雅东构造结北西侧,现今构造活动强烈(蔡火灿等, 2022; 李滨等, 2022)。区内断裂以向东北凸出的近东西—北西—近南北向弧形断裂为主,其次是北东向和北西向断裂。其中,北东向墨脱断裂带和米林断裂带,北西西向嘉黎断裂带和阿帕龙断裂带、喜马拉雅山南麓主边界断裂带、怒江断裂带、澜沧江断裂带晚第四纪以来活动性强烈,属于发震断裂。距离工程区 7 km 的嘉黎断裂带走向北西西,倾向北东,具有强烈的右旋走滑活动特征(图 1)。

工程区地形地貌呈典型的高山峡谷特征,河流整体呈弧形弯曲,主流偏右岸,河谷呈“U”形。河流两岸基岩裸露,岸坡陡峻,山体地表为第四系崩坡积物覆盖,地表植被发育。坝址左岸发育 24 条微断层,右岸发育 26 条微断层,两岸断层发育相对独立,无明显贯穿两岸的断层存在,多为北北西走向

的陡倾角断层,充填物质主要为挤压形成的岩片或岩块岩屑,断层破碎带宽度一般为 10.0~50.0 cm,沿断裂破碎带在两岸山体形成多条冲沟。坝址出露岩性主要以早白垩系黑云母二长花岗岩($K_1\eta^a$)为主,呈灰色—灰白色,花岗结构、块状构造。

2 地应力实测结果及其分析

2.1 测试钻孔基本信息

文章采用的水压致裂法地应力测量技术是国际岩石力学学会试验方法委员会推荐的地应力测试方法之一(基姆和弗兰克林, 1988; 孙叶等, 1998; 谭成轩等, 2006),具有操作简便、数据可靠、可重复测试、测量深度大等优点,被广泛应用在水电工程地应力测试工作中(Zoback and Healy, 1992; 刘允芳, 2002; Haimson and Cornet, 2003; 全海, 2017)。水压致裂法地应力测量分为压裂试验和印模试验两部分,其中压裂试验旨在获取主应力的方向,印模试验旨在获取最大水平主应力方向(张鹏等, 2017b; 孟文等, 2022)。

为了查明工程区应力场特征,共布置了 2 组常规二维水压致裂法地应力测试(ST-1、ST-2)和 2 组三维水压致裂法地应力测试(ST-3、ST-4)。其中, ST-1 布设在左岸, ST-2、ST-3、ST-4 均布设在右岸。

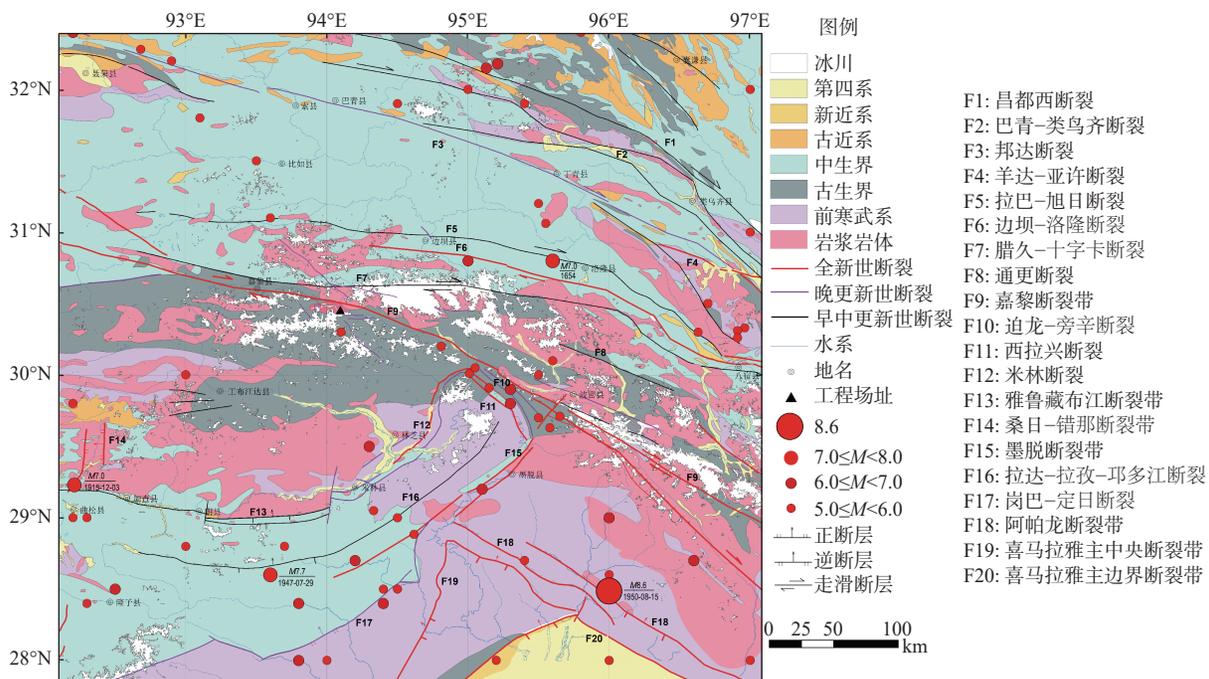


图 1 区域主要活动断裂及地震震中分布图

Fig. 1 Distribution map of main active faults and seismic centers in the research area

ST-1 包括 1 个垂直钻孔 ZK59; ST-2 包括 1 个垂直钻孔 ZK66; ST-3 包括 1 个垂直钻孔 ZK54 和 2 个水平

钻孔 ZK54-1、ZK54-2; ST-4 包括 1 个垂直钻孔 ZK56 和 2 个水平钻孔 ZK56-1、ZK56-2(表 1)。

表 1 测试钻孔基本信息

Table 1 Basic parameters of the test boreholes

测点编号	孔号	钻孔方位角/(°)	钻孔倾角/(°)	孔口高程(埋深)/m	孔深(水位)/m
ST-1	ZK59	/	90	3139.1(214.0)	200.8(78.4)
ST-2	ZK66	/	90	3100.0(112.0)	151.6(100.3)
ST-3	ZK54	/	90		101.0(0)
	ZK54-1	58	-3	3022.5(334.5)	30.8(/)
ST-3	ZK54-2	168	-3		31.0(/)
	ZK56	/	90		80.8(0)
ST-4	ZK56-1	17	-3	3022.5(442.5)	30.8(/)
	ZK56-2	119	-3		30.7(/)

2.2 地应力测量成果

基于岩芯完整情况, 研判 4 个测点各钻孔岩体

的完整性, 并随深度选取合适测段开展压裂试验, 共获得 38 段有效测量曲线, 各测点测试深度见表 2。

表 2 各测点压裂试验测试深度

Table 2 Depth of each measuring point for fracturing test

测点编号	孔号	有效数据/段	测试深度/m
ST-1	ZK59	6	31.00、56.00、81.00、132.00、155.00、192.50
ST-2	ZK66	5	49.00、82.50、101.00、119.40、138.50
ST-3	ZK54	5	12.90、37.00、61.50、87.30、92.00
	ZK54-1	5	10.50、14.50、20.40、24.30、27.50
ST-3	ZK54-2	6	6.84、11.70、14.80、18.36、24.06、27.00
	ZK56	4	36.50、50.50、64.54、74.00
ST-4	ZK56-1	3	14.90、20.40、24.30
	ZK56-2	4	10.70、17.80、24.30、25.57

各测段压裂曲线清晰的显示出压裂段岩石脆性破裂、破裂缝重张和闭合的拐点, 表明地应力测量压裂结果是可靠的, 鉴于数据量较大, 现对每个孔仅选取 1 段典型曲线予以示例(图 2)。

各钻孔压裂试验完成后, 以压裂曲线的破裂峰值明显程度为参考, 选取相应测段开展印模试验, 确定区域最大水平主应力方向。鉴于数据量较大, 印模试验结果同样仅选取代表性测段进行展示(图 3)。

2.2.1 二维地应力测试结果分析

通过上述压力-时间记录曲线中可直接得到岩石的破裂压力 P_b , 瞬时关闭压力 P_s 以及裂缝的重张压力 P_r , 根据压裂特征参数可计算出最大水平主应力 S_H 和最小水平主应力 S_h , 垂直主应力 S_v 为上覆岩体的自重应力, ST-1、ST-2 测点地应力测试结果见表 3。

根据上述测试结果初步分析, ST-1、ST-2 二维地应力测点揭示的地应力基本特征为:

(1) ST-1、ST-2 在测量深度内最大水平主应力 S_H 为 4.17~16.93 MPa, 最小水平主应力 S_h 为 2.80~10.76 MPa, 水平主应力随深度呈近似线性增大, ST-1 最大水平主应力 $S_H=0.0733H+2.1062(R^2=0.9842)$; 式中 H 为钻孔深度, R^2 为相关系数, 下同), 最小水平主应力 $S_h=0.0427H+1.4782(R^2=0.9882)$; ST-2 最大水平主应力 $S_H=0.0638H+8.506(R^2=0.9672)$, 最小水平主应力 $S_h=0.0305H+6.287(R^2=0.7656)$ 。

(2) 工程区地壳浅层 3 个主应力之间的关系, 除 ST-1 的 31.0 m、56.0 m 这 2 个浅层测段的主应力状态主要表现为 $S_v>S_H>S_h$, 其余 9 个测段均表现为 $S_H>S_v>S_h$ 或者 $S_H>S_h>S_v$, 水平侧压系数 K_H 为 1.00~

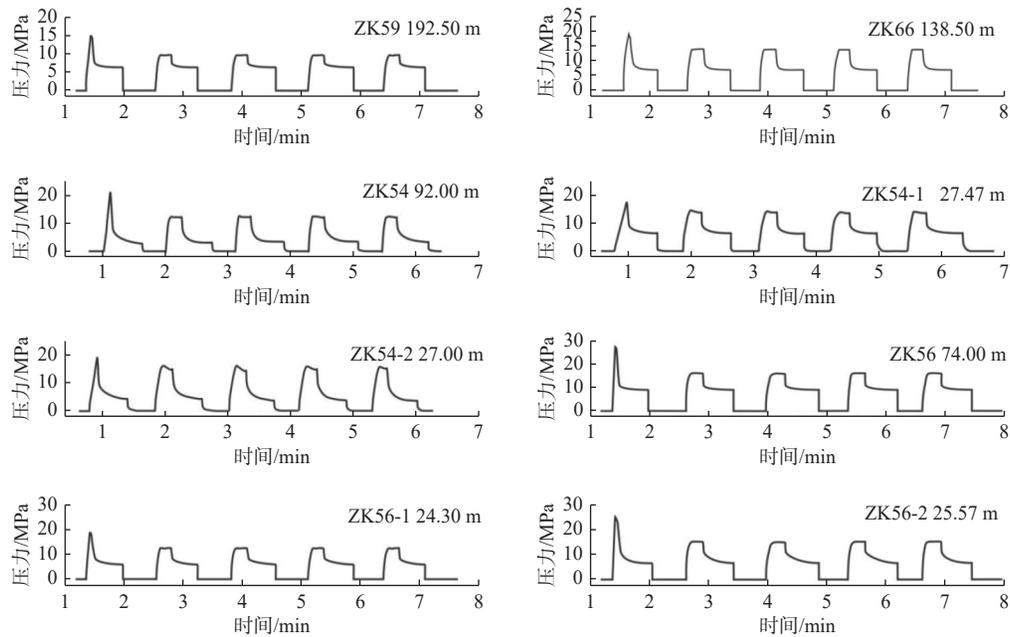


图2 测点地应力典型曲线

Fig. 2 Typical curves of in-situ stress test in each test point

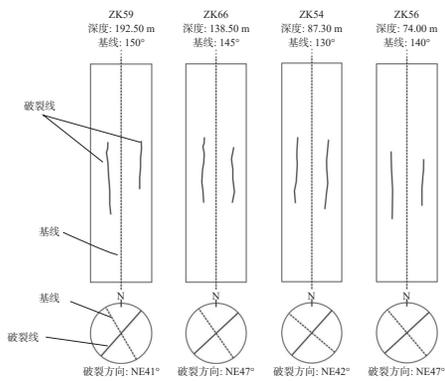


图3 测点印模定向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impression orientation at different fracture section

2.77, 平均值为 2.06, 表明工程区内水平应力占主导地位。

(3) 工程区内最大水平主应力方位为 NE 38°~NE 47°, 平均为 NE 42°, 表明现今构造应力场以北东向挤压为主导, 与区域构造应力场主压应力方位基本一致。

2.2.2 三维地应力测试结果分析

对单独的水平孔或垂直孔而言, 获取的参数均为垂直于钻孔轴线横截面上的大主应力 S_H 、小主应力 S_h 和破裂方向, 这些参数仅仅代表了平面上的应力状态。沿不同方向的 3 个钻孔进行水压致裂三维地应力测量, 其计算方法是通过单孔测量大、小主应力 S_H 、 S_h , 根据相关力学知识建立 6 个应力分量

和 S_H 、 S_h 的关系式, 先求出 6 个应力分量, 再应用三维应力状态的特征方程即可求出 3 个主应力的大小和方向。将 ST-3、ST-4 测点钻孔的平面应力测量结果及其相对应的钻孔空间方位等参数, 按照上述方法计算可得到空间三维应力张量。该方法实际参与三维地应力计算的数据, 应符合理论压裂曲线的测段, 并考虑到平硐开挖引起的应力释放等效效应, 尽量选取应力扰动区以外的地应力测量数据, 即深度较大的地应力测量结果 (或者较深测段的平均值) 作为计算数据。ST-3、ST-4 测点三维地应力计算结果见表 4。

在测量深度范围内, 最大主应力 σ_1 为 14.20~16.23 MPa, 主应力方向呈近北东向, 仰角 $-18.2^\circ \sim -22.8^\circ$; 中间主应力 σ_2 为 12.56~14.28 MPa, 主应力方向呈近北西向, 仰角 $19.6^\circ \sim 20.0^\circ$; 最小主应力 σ_3 为 7.68~9.07 MPa, 主应力方向呈南东向, 仰角 $-58.0^\circ \sim -62.0^\circ$ 。表明工程区地应力场受重力和构造运动的共同作用。

综合上述二维和三维地应力测试结果, 工程区三向主应力大小关系总体表现为 $S_H > S_3 > S_h$, 表明浅地表现今构造应力环境以水平主应力占主导地位。工程区最大水平主应力方位为 NE 38°~NE 47°, 平均为 NE 43°, 表明现今构造应力场以北东向为主导, 这与中国及邻区现代构造应力场图统计结果 (谢富仁等, 2007)、工程区及邻区震源机制解、

表3 ST-1、ST-2 二维地应力测试结果

Table 3 The results of two dimensional in-situ stress measurement (ST-1&ST-2)

测点编号	钻孔编号	深度H/m	压裂特征参数/MPa			主应力值/MPa			S_H 方位
			破裂压力 P_b	重张压力 P_r	关闭压力 P_c	S_H	S_h	S_v	
ST-1	ZK59	31.00	9.32	3.92	2.49	4.17	2.80	6.47	
		56.00	8.94	4.41	3.14	6.13	3.70	7.13	
		81.00	9.37	5.89	4.04	7.82	4.85	7.79	NE38°
		132.00	13.42	8.26	6.32	12.80	7.64	9.14	NE45°
		155.00	14.03	8.58	6.63	13.64	8.18	9.75	
		192.50	15.01	9.55	7.45	15.51	9.38	10.75	NE41°
ST-2	ZK66	49.00	21.80	12.17	7.49	11.28	7.98	4.27	
		82.50	16.57	12.11	8.24	14.26	9.07	5.15	NE39°
		101.00	15.51	9.07	7.32	14.90	8.33	5.64	NE43°
		119.40	17.93	12.91	9.06	16.47	10.25	6.13	
		138.50	18.76	13.57	9.37	16.93	10.76	6.64	NE47°

表4 ST-3、ST-4 三维地应力测试计算结果

Table 4 The results of three dimensional in-situ stress measurement (ST-3&ST-4)

测点编号	埋深/m	最大主应力 σ_1			中间主应力 σ_2			最小主应力 σ_3		
		量值/MPa	方位角/(°)	仰角/(°)	量值/MPa	方位角/(°)	仰角/(°)	量值/MPa	方位角/(°)	仰角/(°)
ST-3	334.5	14.20	235.4	-18.2	12.56	152.5	19.6	9.07	106.0	-62.0
ST-4	441.5	16.23	248.0	-22.8	14.28	167.0	20.0	7.68	114.0	-58.0

GPS 应变监测等研究成果相一致(张鹏等, 2017a; 丰成君等, 2022), 从而确定工程区的地应力测试结果比较可靠。

3 工程区应力场反演分析

为了更好地全面了解工程区现今地应力状态, 为工程设计和安全施工提供依据, 文章基于该水电站地形测绘资料, 利用 ANSYS 有限元软件建立了三维地质模型, 并基于地应力实测数据反演工程区的应力场特征, 开展地应力场总体特征分析和水电站关键工程部位局部应力场特征分析。

3.1 应力场反演分析步骤

有限元法应力回归应力场分析时, 需要先根据现有地形地质勘测资料和物理力学资料, 建立三维地质模型, 把可能形成应力场的因素(如岩体自重、地质构造运动等)作为待定因素拟定初始载荷分别进行有限元计算。依据应力试算法原理, 通过不断调整模型的边界条件, 检验测点部位的应力状态及其变化规律, 最终得到与实测地应力值和区域构造背景拟合最好的边界条件, 进而获得工程区应力场特征。

3.2 计算范围选取与模型建立

建立工程区模型时, 需充分考虑地形地貌、地质构造、介质不均匀性等因素, 选取合适的应力场反演地质模型范围, 从而客观地反演出现今应力场的分布规律。在河谷地区建立有限元模型时, 一般为减小边界效应, 模型的几何范围应包含全部工程影响区域, 并适当增大, 此外应选择分水岭作为模型边界, 使两侧地形大致对称。建立模型时, 规定有限元软件整体坐标系 X 轴代表正东方向, Y 轴代表正北方向, 计算域包括全部地下厂房群(厂房、引水隧洞等), 长约 1800 m, 宽约 1700 m, 模型底面设在高程 2000 m 处, 计算域为一长方体, 模型长边走向 NE 50°, 与区域最大水平主应力方向基本保持一致。模型共划分计算单元 722372 个, 节点数 131219 个(图 4), 计算精度完全满足工程要求。

3.3 模型参数选取

工程区岩性单一, 均为白垩纪黑云母二长花岗岩, 岩石较坚硬, 裂隙不发育, 岩体相对完整。根据室内试验资料, 岩石干密度 2.59~2.62 g/cm³, 计算中岩石密度取平均值 2.60 g/cm³。根据现场岩体变形试验资料, 岩体弹性模量 31.30~38.30 GPa, 计算参数取平均值 33.58 GPa, 泊松比取 0.28。

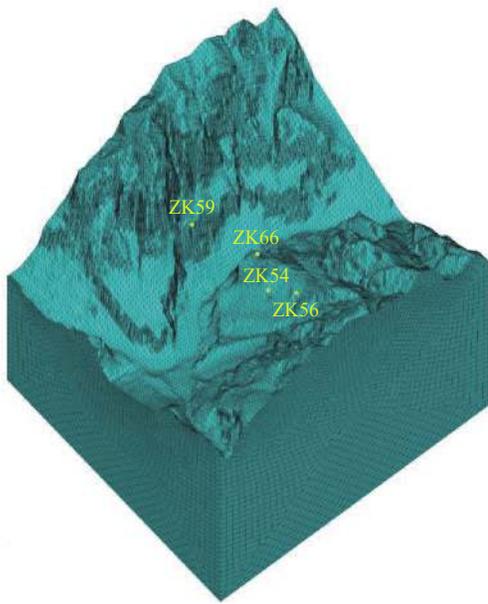


图4 工程区有限元计算模型

Fig. 4 FEM model of the engineering area

3.4 地应力反演结果分析

在进行有限元计算时,相较于应力边界条件,位移边界条件有较好的连续性和均匀性,此次采用调整位移边界条件来实现应力场反演分析。确定模型边界条件主要考虑工程区地形地貌和应力场

特征。地应力场反演首先对计算模型整体附加重力加速度,并对模型4个侧面及底面施加法向位移约束,进行重力场反演。然后清除计算模型2个相邻侧面的法向位移约束,并参考前文中实测水平主应力拟合梯度值对这2个侧面法向分别施加水平梯度荷载(最大水平主应力随深度变化梯度平均值为0.0686,最小水平主应力随深度变化梯度平均值为0.0366),对非加载侧面和底面边界约束条件与重力场反演时一致,进行构造应力场反演,通过不断调试,直至测孔位置主应力反演值与地应力实测值达到最大限度的拟合,同时应力方向也与区域地应力场方向近似一致。

分别提取ST-1、ST-2、ST-3(ZK54)、ST-4(ZK56)对应深度段地应力反演值,与实测地应力数据进行对比分析,结果如表5所示。反演值与实测值总体对应较好,量值随深度变化趋势基本相同,除ST-1测点浅表部因地形影响存在卸荷现象导致实测值偏低外,大部分反演值与实测值相对误差均控制在20%以内,各测点的最大水平主应力方向反演值与实测值也较为接近。因此,文章基于有限元软件反演获得的工程区应力场特征是合理、可靠的。同时,也检验了现场地应力实测结果的有效性。

表5 地应力实测数据与反演值对比表

Table 5 Comparison of in-situ stress data and inversion data

测点编号	序号	深度/m	S_H /MPa		S_V /MPa		S_3 /MPa	
			实测	反演值	实测	反演值	实测	反演值
ST-1	1	31.00	4.17	15.11	2.80	2.45	6.48	9.21
	2	56.00	6.13	15.53	3.70	3.84	7.14	9.86
	3	81.00	7.82	14.72	4.85	4.95	7.80	10.36
	4	132.00	12.80	15.44	7.64	6.93	9.15	11.08
	5	155.00	13.64	15.30	8.18	7.59	9.76	11.32
	6	192.50	15.51	15.15	9.38	8.84	10.76	11.79
ST-2	7	49.00	11.28	11.86	7.98	7.54	4.31	2.02
	8	82.50	14.26	14.11	9.07	9.34	5.19	3.45
	9	101.00	14.90	14.93	8.33	10.25	5.68	4.59
	10	119.40	16.47	15.22	10.25	10.94	6.17	5.83
	11	138.50	16.93	15.10	10.76	11.29	6.68	6.57
ST-3	12	12.90	8.27	11.56	5.36	5.28	9.18	9.89
	13	37.00	10.07	12.07	6.51	6.09	9.82	10.47
	14	61.50	13.11	12.43	8.20	6.76	10.47	10.91
	15	87.30	13.73	12.81	8.50	7.50	11.15	11.38
	16	92.00	13.70	12.88	9.23	7.69	11.28	11.49
ST-4	17	36.50	13.97	11.90	9.63	7.10	12.72	10.84
	18	50.50	17.38	12.10	11.24	7.40	13.09	11.04
	19	64.54	14.11	12.33	10.34	7.74	13.46	11.28
	20	74.00	17.74	12.49	11.79	7.99	13.71	11.44

工程区3个主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分布特征见图5,云图显示工程区应力场明显受到自重应力和构造应力的双重作用,地表及浅部地应力场主要受地形因素影响,水平构造应力在凸起部位应力值较低,而在沟谷部位应力值较高,产生应力集中,在模型深部主要反映出自重应力的作用。由于地应力测量数据主要集中在模型浅部,而模型计算的深部应力值缺乏实测数据约束,因此模型主要关注应力测量深度内的应力值量和应力范围信息,模型深部应力无实测数据验证其可靠性,也不作为工程关注的对象。

电站地下厂房主洞室高程为2995 m,通过提取该高程水平面的 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 应力云图(图6),可直观地认识厂房区域地应力状态及其分布特征。应力云图显示以下分布规律。

σ_1 水平应力云图(图6a)基本上呈等高线条带式分布,计算区域内应力值为11.23~34.46 MPa,高应力值主要沿沟谷分布,厂房区域应力值为11.7~12.12 MPa, σ_1 方向在工程区整体上基本为北东向,在沟谷处应力方向局部发生偏转。

σ_2 水平应力云图(图6b)在计算区域范围内应力值为8.13~19.58 MPa,在厂房区域应力值为9.81~10.74 MPa, σ_2 方向在工程区附近总体为北西向,也在沟谷处应力方向局部发生偏转。

σ_3 水平应力云图(图6c)在计算区域范围内应力值为2.04~9.60 MPa,在厂房区域的 σ_3 计算应力值为5.22~6.85 MPa,厂房上的山顶高程为3300~3470 m,计算值与估算的垂直应力理论值较为接近, σ_3 主应力方位表现为复杂地形条件下的垂向应力,总体上为沿着地形坡度呈辐射状向下,越往山脊深处越接近铅垂,往河谷处与铅垂方向夹角变大。

沿引水隧洞轴线沿线切开模型,获得主应力分布特征(图7)。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 水平应力云图基本随地形走势呈条带分布,主应力值的分布也明显受地形影响,靠近河谷附近的区域应力有集中趋势,应力值较大,例如引水隧洞沿线最大主应力 σ_1 为11.80~14.05 MPa(图7a),中间主应力 σ_2 为10.13~12.83 MPa(图7b),最小主应力 σ_3 为4.56~8.49 MPa(图7c)。

4 工程稳定性讨论

根据现行《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2016)中采用最大主应力 σ_m 的量级和岩石强度应力比 R_b/σ_m (R_b 为岩石单轴饱和抗压强度)来综合判定岩体初始应力分级。根据室内试验成果,岩石单轴饱和抗压强度为80 MPa,最大主应力为16.93 MPa, $4 < R_b/\sigma_m < 7$ 且 $10 \leq \sigma_m < 20$ MPa,因此工程应力分级为中等地应力区,在地下厂房和引水隧洞施工开挖过程中可能发生I级轻微岩爆,洞壁可能会有轻微剥离和掉块现象,无弹射现象,一般影响深度小于0.5 m,对施工影响较小,开挖时需根据现场实际情况进行简单支护。该水电站地下厂房轴线方向和引水隧洞轴线方向整体为北东向,与实测最大主应力方向呈小角度相交,地应力场对工程洞室的稳定性有利。施工过程中应综合考虑实际地质情况,选择采用适宜的隧洞施工技术,并加强超前地质预报、加强支护工作和监测工作,确保地下建筑物的安全建设。

5 结论

结合该水电站工程地质条件和实测地应力结

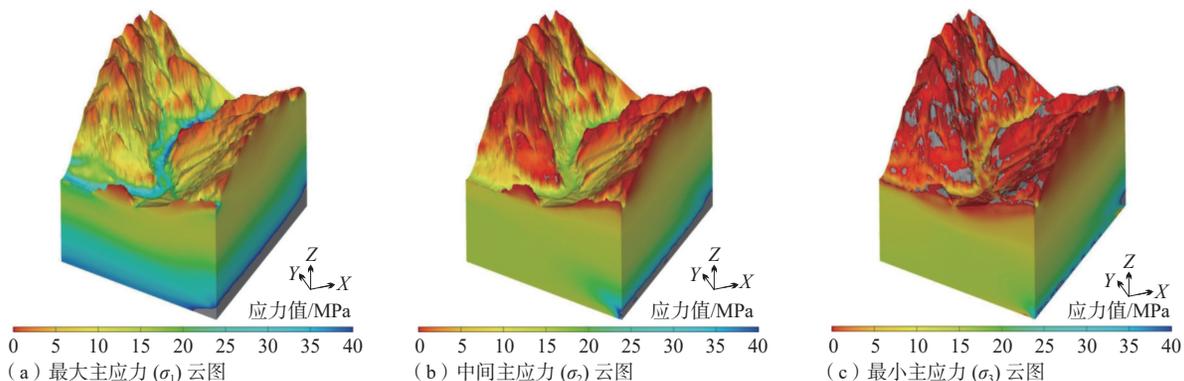


图5 工程区主应力分布云图

Fig. 5 Nephogram of principal stress distribution in the engineering area

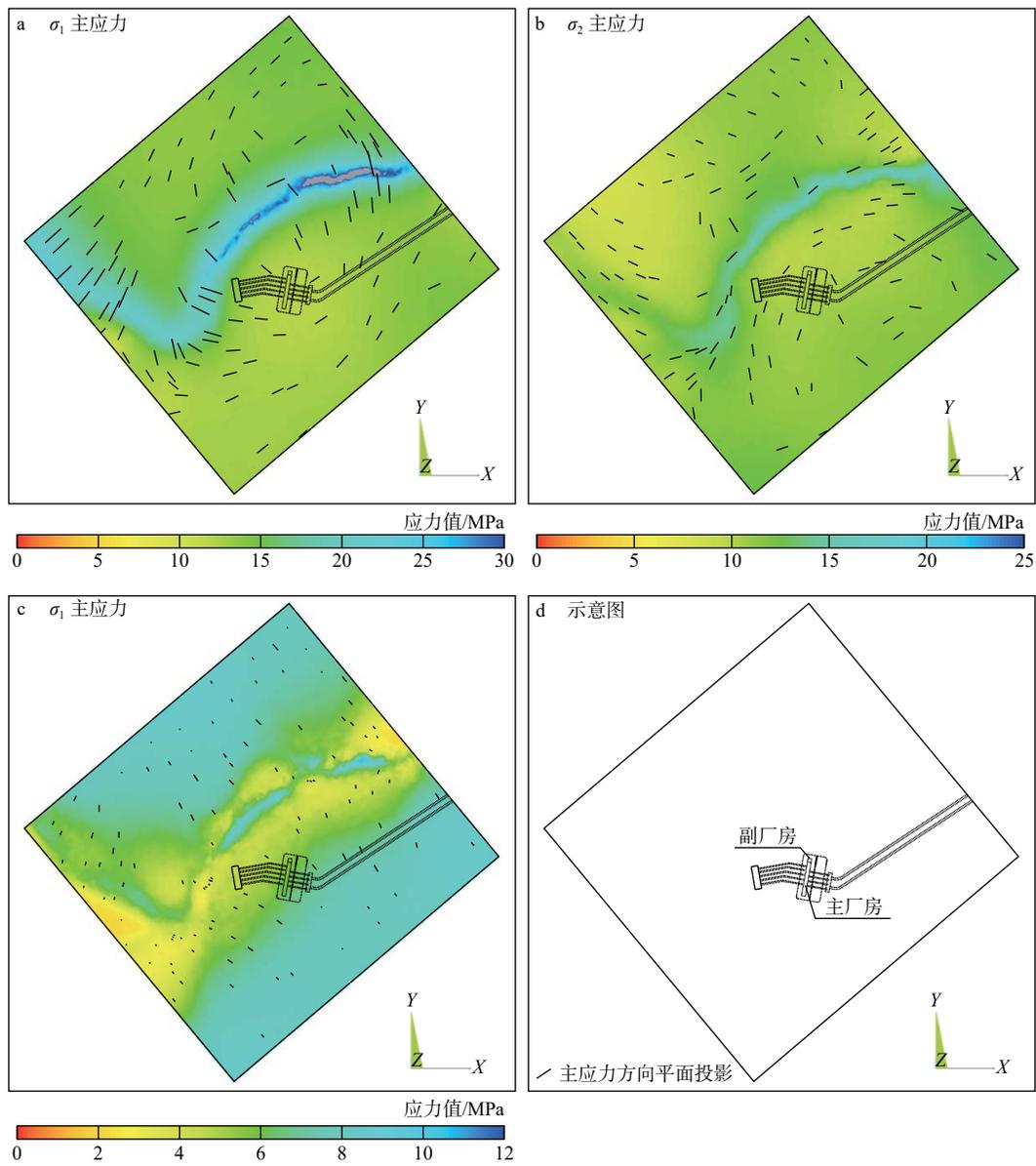


图 6 2995 m 高程水平面（地下厂房所在层）应力云图

Fig. 6 Horizontal stress nephogram at 2995-meter elevation

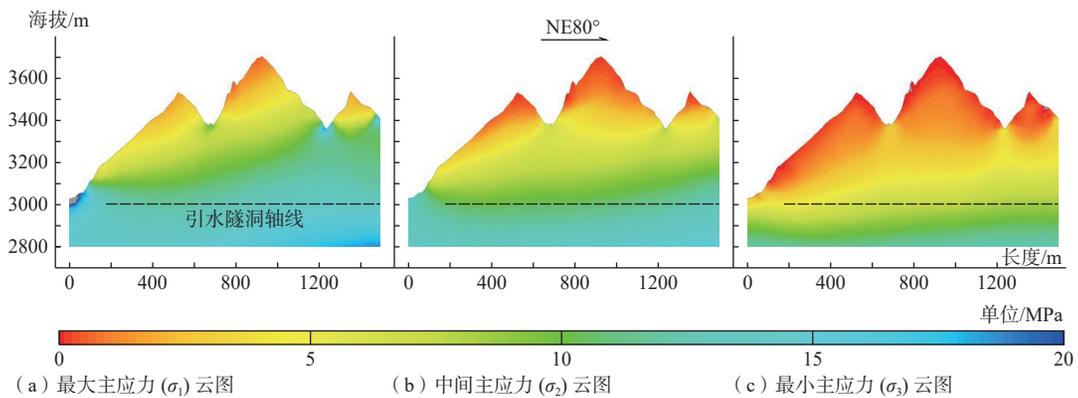


图 7 引水隧洞轴线沿线主应力分布云图

Fig. 7 Nephogram of stress distribution along the diversion tunnel

果,采用有限元对工程区地应力进行反演分析,初步得出以下结论。

(1)二维地应力测试结果显示最大水平主应力为4.17~16.93 MPa,三维地应力测试结果显示最大主应力为14.20~16.23 MPa。实测最大水平主应力方位为NE 38°~NE 47°,平均为NE 43°,表明现今构造应力场以北东向为主导,与区域构造应力场主压应力方位基本一致。

(2)通过对比实测和反演数据,工程区应力场反演分析结果基本在理论误差($\leq 20\%$)范围内,反演分析结果具有较好的可靠性,对后续工程设计和施工具有一定的指导意义。

(3)反演分析获得地下厂房区域2995 m高程平面的应力场特征: σ_1 应力值范围为11.7~12.12 MPa, σ_2 应力值范围为9.81~10.74 MPa, σ_3 应力值范围为5.22~6.85 MPa。引水隧洞沿线 σ_1 应力值范围为11.8~14.05 MPa, σ_2 应力值范围为10.13~12.83 MPa, σ_3 应力值范围为4.56~8.49 MPa。

(4)工程区属于中等应力区,地下厂房和引水隧洞轴线方向与实测最大主应力方向呈小角度相交,地应力场对工程洞室的稳定性有利。

References

- CAI H C, WANG W T, DUAN L, et al., 2022. Paleomagnetic evidence of Cenozoic tectonic deformation in Lulehe area, Qaidam basin, northeastern margin of Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3345-3359. (in Chinese with English abstract)
- CHENG W R, ZHANG W C, LIU Y, 2021. Inversion of in-situ stress field in underground powerhouse area of a hydropower station[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 38(6): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- ENGLAND P, MOLNAR P, 1997. Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics[J]. *Science*, 278(5338): 647-650.
- FAN Q X, LIN P, JIANG S, et al., 2020. Review on the rock mechanics and engineering practice for large hydropower stations along the downstream section of the Jinsha River[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 60(7): 537-556. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)
- FU C H, WANG W M, CHEN S H, 2006. Back analysis study on initial geostress field of dam site for XILUODU hydropower project[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(11): 2305-2312. (in Chinese with English abstract)
- HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: Hydraulic Fracturing (HF) and/or Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures (HTPF)[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8): 1011-1020.
- HAN B, XIAO Q, DING X C, et al., 2022. Study on the initial geostress distribution law of surrounding rock of underground cavern of Jinchuan hydropower station[J]. *Northwest Water Power*(2): 67-70. (in Chinese with English abstract)
- HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al., 1992. Raising Tibet[J]. *Science*, 255(5052): 1663-1670.
- HOU J, WU Z, LIU N, et al., 2019. Research on key technical problems of hydropower design in high-altitude deep gorge area of Tibet[J]. *Water Power*, 45(2): 14-17, 38. (in Chinese with English abstract)
- KIM K, FRANKLIN J A, 1988. ISRM: Suggested methods for rock stress determination[J]. ZHANG S T, trans. *Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering*, 7(4): 357-388. (in Chinese)
- LEE S G, 1973. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science and Technology Press. (in Chinese)
- LI B, YIN Y P, TAN C X, et al., 2022. Geo-safety challenges against the site selection of engineering projects in the eastern Himalayan syntaxis area[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 907-918. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y F, 2000. Geostress and engineering construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press. (in Chinese)
- LIU Y F, ZHONG Z W, WANG J, 2002. Interpretation of 3-dimensional geostress results measured by hydraulic fracturing technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(6): 833-838. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)
- MOLNAR P, ENGLAND P, MARTINOD J, 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon[J]. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357-396.
- QUAN H, 2017. Application of 3-dimensional hydraulic fracturing method to in-situ stress measurement in hydropower engineering[J]. *Sichuan Water Power*, 36(1): 75-80. (in Chinese)
- REN Y Q, TANG B L, CHEN X M, et al., 2021. Inversion analysis of the Three dimension Geostress field in a tunnel[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 643(1): 012047.
- ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, KING R W, et al., 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 276(5313): 788-790.
- SUN Y, TAN C X, LI K S, et al., 1998. Quantitative assessment and research of regional crustal stability[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- TAN C X, SUN W F, SUN Y, et al., 2006. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1627-1632. (in Chinese with English abstract)
- TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- WANG E Q, BURCHFIEL B C, JI J Q, 2001. Calculation of the Cenozoic crustal shortening in eastern Himalayan syntaxis and its geological evidences[J]. *Science in China (Series D)*, 31(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

- English abstract)
- WANG X G, WANG J D, HOU T S, et al., 2016. Geostress test and analysis of the Tibet Bangpu mining area[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(2): 156-162.
- XIAO B Z, 2008. Measurement and study of geo-stresses for underground plant Area of Yantan hydropower station[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 25(1): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- XIAO L, LUO S W, CHEN R H, et al., 2019. Three-dimensional simulation inverse analysis of initial Geostress field of a hydropower station[J]. *Northwest Hydropower*(5): 86-89. (in Chinese with English abstract)
- XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. *Progress in Geophysics*, 22(1): 131-136. (in Chinese with English abstract)
- XIE H Q, XIAO M L, HE J D, et al., 2008. Regression analysis of initial Geostress for dam region of Jinping hydropower station[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 25(5): 50-54. (in Chinese with English abstract)
- YUAN F B, LIU J, LI P J, et al., 2007. Back analysis and multiple-factor influencing mechanism of high geostress field for river valley region of Laxiwa hydropower engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 28(4): 836-842. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, QU Y M, GUO C B, et al., 2017a. Analysis of in-situ stress measurement and real-time monitoring results in Nyching of Tibetan Plateau and its response to Nepal $M_s 8.1$ earthquake[J]. *Geoscience*, 31(5): 900-910. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, SUN Z G, WANG Q N, et al., 2017b. In-situ stress measurement and stability analysis of surrounding rocks in the north section of deep buried tunnel in Muzhailing[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(6): 893-903. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y X, SONG C S, CAI M F, et al., 2010. Geostress measurements by hydraulic fracturing method at great depth of boreholes and numerical modelling predictions of stress field[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(4): 778-786. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Y, LI Q C, PAN B, et al., 2018. Back analysis of initial geostress field in deep-cut valley of Yangfanggou hydropower station[J]. *Yangtze River*, 49(24): 44-48, 71. (in Chinese with English abstract)
- ZOBACK M D, HEALY J H, 1992. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass scientific research borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B4): 5039-5057.
- 附中文参考文献**
- 蔡火灿, 王伟涛, 段磊, 等, 2022. 青藏高原东北缘柴达木盆地路乐河地区新生代构造变形的古地磁证据[J]. *地质学报*, 96(10): 3345-3359.
- 程王润, 张文春, 刘英, 2021. 某水电站地下厂房区地应力场反演[J]. *吉林建筑大学学报*, 38(6): 12-18.
- 樊启祥, 林鹏, 蒋树, 等, 2020. 金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 60(7): 537-556.
- 丰成君, 李滨, 李惠, 等, 2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. *地质力学学报*, 28(6): 919-937.
- 付成华, 汪卫明, 陈胜宏, 2006. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 25(11): 2305-2312.
- 韩斌, 肖清, 丁新潮, 等, 2022. 金川水电站地下洞室围岩初始地应力分布规律研究[J]. *西北水电*(2): 67-70.
- 侯靖, 吴忠, 刘宁, 等, 2019. 西藏高海拔深切峡谷地区水电设计关键技术问题研究[J]. *水力发电*, 45(2): 14-17, 38.
- 基姆, 弗兰克林, 1988. 国际岩石力学学会试验方法委员会确定岩石应力的建议方法[J]. 张受天, 译. *岩石力学与工程学报*, 7(4): 357-388.
- 李滨, 殷跃平, 谭成轩, 等, 2022. 喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战[J]. *地质力学学报*, 28(6): 907-918.
- 李四光, 1973. *地质力学概论* [M]. 北京: 科学出版社.
- 刘允芳, 2000. *岩体地应力与工程建设* [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社.
- 刘允芳, 钟作武, 汪洁, 2002. 水压致裂法三维地应力测量成果计算与分析的探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 21(6): 833-838.
- 孟文, 田涛, 孙东生, 等, 2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. *地质力学学报*, 28(4): 537-549.
- 全海, 2017. 三维水压致裂法地应力测试在水电工程中的应用[J]. *四川水力发电*, 36(1): 75-80.
- 孙叶, 谭成轩, 李开善, 等, 1998. 区域地壳稳定性量化评价 [M]. 北京: 地质出版社.
- 谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 等, 2006. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. *地质学报*, 80(10): 1627-1632.
- 王二七, BURCHFIEL B C, 季建清, 2001. 东喜马拉雅构造结新生代地壳缩短量的估算及其地质依据[J]. *中国科学(D辑)*, 31(1): 1-9.
- 肖本职, 2008. 广西岩滩水电站地下厂房区地应力测试与分析[J]. *长江科学院院报*, 25(1): 65-69.
- 肖蕾, 骆世威, 陈仁宏, 等, 2019. 某水电站初始地应力场三维模拟反演分析[J]. *西北水电*(5): 86-89.
- 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等, 2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. *地球物理学进展*, 22(1): 131-136.
- 谢红强, 肖明砾, 何江达, 等, 2008. 锦屏水电站坝区初始地应力场回归反演分析[J]. *长江科学院院报*, 25(5): 50-54.
- 袁风波, 刘建, 李蒲健, 等, 2007. 拉西瓦工程河谷区高地应力场反演与形成机理[J]. *岩土力学*, 28(4): 836-842.
- 张鹏, 曲亚明, 郭长宝, 等, 2017a. 西藏林芝地应力测量监测与尼泊尔 $M_s 8.1$ 级强震远场响应分析[J]. *现代地质*, 31(5): 900-910.
- 张鹏, 孙治国, 王秋宁, 等, 2017b. 木塞岭深埋隧道北段地应力测量与围岩稳定性分析[J]. *地质力学学报*, 23(6): 893-903.
- 张延新, 宋常胜, 蔡美峰, 等, 2010. 深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 29(4): 778-786.
- 周勇, 李啟常, 潘兵, 等, 2018. 杨房沟水电站深切河谷地应力场反演分析[J]. *人民长江*, 49(24): 44-48, 71.