

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0845-07

# 白鹤滩水电站初始地应力场研究分析

金长宇<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>2</sup>, 张春生<sup>1</sup>

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:**金沙江下游拟建的白鹤滩水电站上接乌东德梯级, 下邻溪洛渡梯级, 是继三峡和溪洛渡之后又一座千万千瓦级的水电站。白鹤滩水电站采用地下式厂房, 其厂房的高度和跨度分别为 78.5 m 和 32 m。为了保证地下洞室群围岩的稳定性, 需要准确掌握初始地应力场的方向和大小。依据地质构造作用和现场实测方法分析发现, 白鹤滩水电站左、右岸的初始地应力场, 由于受到河流侵蚀和岸坡卸荷等因素影响, 两岸厂区的地应力场方向在局部产生一定的偏转, 从该地区的 NWW 方向变为 NE 方向, 通过数值反演方法对计算区域的边界条件进行回归, 与实测值比较确定回归边界条件的合理性和准确性。

**关 键 词:** 初始地应力场; 反演; 地质构造; 神经网络

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

## Research on initial stress field of Baihetan hydropower station

JIN Chang-yu<sup>1,2</sup>, FENG Xia-ting<sup>2</sup>, ZHANG Chun-sheng<sup>1</sup>

(1. East China Hydropower Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** A planned Baihetan hydropower station on the lower reaches of the Jinsha River, located between the hydropower stations of Wudongde and Xiluodu, is the third biggest hydropower station following the Three Gorges project and the Xiluodu power station. The station will have an installation capacity of 10 million kW. Baihetan hydropower station uses underground powerhouse, of which height and span respectively are 78.5 m and 32 m. To guarantee stability of wall rock of underground cavern, it is necessary to know the magnitude and direction of initial in-situ stress field exactly. Based on geological structure analysis and field testing, it is found that the directions of initial in-situ stress fields of both banks of Baihetan hydropower station, which are influenced by factors, such as fluvial erosion and slope unloading deflect from NWW to NE partly. Numerical inverse method is used to inverse boundary conditions of study area, it has rationality and veracity by comparing with measuring values.

**Key words:** initial stress field; back analysis; geological structure; neural network

## 1 引 言

地应力场是地质力学与岩体力学研究的基本内容之一, 初始地应力场对于大型地下工程而言(诸如水电、核电工程的地下厂房、长隧道等)是作用在支护结构物上的主要荷载, 它直接影响洞室的围岩稳定, 因此, 准确确定初始地应力场是地下工程设计和分析首要解决的问题。岩体初始地应力是指天然岩体在工程建设开挖之前所具有的自然应力状态。初始地应力场则是指开挖前某一特定时间内的地应力空间分布, 它在地质年代上是随着时间和空间而不断变化的非稳定场, 但相对于工程建设而言,

完全可以把它看成是一个相对稳定的应力场。

对初始地应力场的认识经历了从地下结构的浅埋到深埋, 从仅考虑自重应力到复杂构造应力的过程。自瑞典地质学家 Heim 提出初始地应力概念后, 经历了近百年的研究, 出现了多种确定方法, 其中利用神经网络, 遗传算法, 支持向量机等非线性分析手段回归地应力场的方法是近些年岩土方面的研究热点<sup>[1-2]</sup>。

白鹤滩厂区地质成因复杂, 为准确把握白鹤滩地应力场的分布情况, 本文借助地质成因、现场实测、片帮现象以及反分析手段对白鹤滩电站初始地应力场的分布情况进行研究分析。

收稿日期: 2009-03-04

基金项目: 中国科学院岩土力学与工程国家重点实验室资助 (No. Z110801); 青年科学基金资助项目 (No. 40902090)。

第一作者简介: 金长宇, 男, 1979 年生, 博士后, 工程师, 主要从事地下工程方面的研究工作。E-mail: jin\_cy@ccidi.com

## 2 工程概况与地质条件<sup>[3]</sup>

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内,距巧家县城 45 km,上接乌东德梯级,下邻溪洛渡梯级。电站规模巨大,初拟水库正常蓄水位为 820 m,总库容为  $179.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,电站总装机容量 12 600 MW,是我国继三峡、溪洛渡之后开展前期工作的又一座千万千瓦级水电站。两岸地下式厂房拟以首部开发方式布置,地下洞室群主要由主厂房、主变开关室、尾水调压室、母线洞、交通洞、引水、尾水隧洞等多个洞室组成,其中地下主厂房的边墙高度、洞室跨度分别为 78.5 m 和 32 m。

白鹤滩厂区属高原深谷地貌,地势北高南低,向东侧倾斜,左岸为大凉山山脉,整体上呈斜坡地形;右岸为药山山脉,主要为陡坡、陡壁地形,参见图 1。

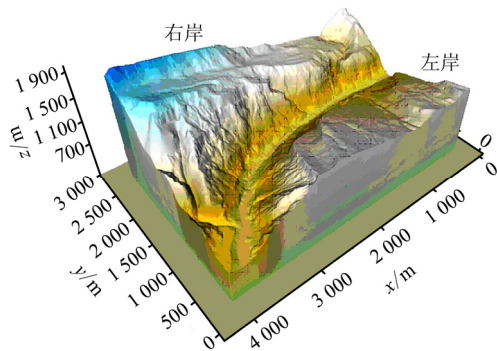


图1 白鹤滩厂区地形图  
Fig.1 Relief map of Baihetan

白鹤滩厂区的建基岩主要为二叠系上统峨眉山组玄武岩;该岩层下伏二叠系下统茅口组灰岩;上覆三叠系下统飞仙关组砂页岩,三叠系上统须家河组砂岩、泥岩、白云岩。各地层呈假整合接触,第四系松散堆积物主要分布于河床,阶地及缓坡台地上。

## 3 厂区主要地质构造作用

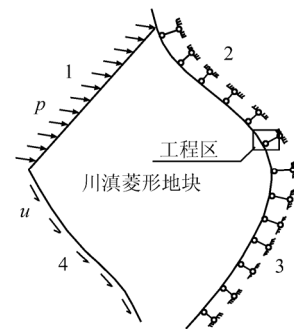
岩体的自重和构造运动是引起地应力的主要原因,其中尤以构造运动对地应力的形成影响最大。当前的应力状态主要由最近一次的构造运动所控制,但也与历史上的构造运动有关。各次构造运动的地应力场经过多次叠加,加上地壳抬升、河流下切、局部构造等因素影响,造成了地应力状态的复杂性和多变性。要准确把握坝址区地应力场,了解白鹤滩坝址区所经历的构造作用过程、地形地貌演化历史是必要的。

坝址区出露地层主要为二叠上统峨眉山组玄武岩。自峨眉山玄武岩形成以来,坝址区所经历的构造运动可大致划分为 6 个阶段:①华力西运动阶段;②印支运动阶段;③燕山运动阶段;④四川运动阶段;⑤喜山运动阶段;⑥新构造运动阶段。其中后两个阶段是影响白鹤滩厂区地应力形成的主要地质构造运动。

喜山期以来,随印度板块沿 NNE 向挤压中国大陆板块,使扬子西缘断裂产生了大规模走滑。构造应力场以 NS 近水平向缩短和 EW 近水平向伸展为主。坝址区没形成新的断裂系统,主要是先存断裂再次活动。NW 向断层右行滑移,NE 向断层左行。

新构造运动主要指川滇菱形地块形成以来所发生的构造运动。新构造运动阶段,青藏高原物质向东挤出,使川滇菱形地块从扬子陆块分离,并发生向南的运动和顺时针转动。在这样的构造格局下,川滇菱形地块依据地应力场的差异可总体划分为 3 个区:30°N 以北为近东西向,30°N 以南、100°E 以东为 NW~NWW 向,30°N 以南、100°E 以西为 NNE~NE 向。工程区位于第 2 区,主压应力场方向为 NW~NWW 向。新构造运动在坝址区没有产生新的断裂,主要是先存断裂体系和层内、层间错动带再次活动。

另外,中更新世以来,金沙江水系逐渐形成、贯通,坝址区河流侵蚀下切,逐步形成目前的地貌形态。



1—小金江断裂带; 2—则木河断裂带;  
3—小江断裂带; 4—红河断裂带

图2 新构造期形成菱形地块  
Fig.2 Rhombic plot of new tectonic movement

依据地震机制解和实测地应力情况以及中国西南地区现今构造应力场分布的规律可知:坝址区所在的宁南地区位于川滇菱形地块东侧,由于印度板块向北推挤,导致中国西南地区地壳南北向缩短、东西向伸展,青藏高原物质向东挤出,进而在西昌-宁南一带形成 NWW 向挤压应力场。因此,根据地

质构造分析，厂区主压应力场方向为 NW~NWW 向。

### 4 现场实测<sup>[4]</sup>

为了能够准确掌握白鹤滩水电站厂区地应力场的大小和方向，在左、右岸的 PD61、PD62 平硐内以及河谷附近进行了地应力测试，现场在  $\sigma$ CZK1、 $\sigma$ CZK6、 $\sigma$ CZK8、CZK3(左岸)和  $\sigma$ CZK9、 $\sigma$ CZK14、 $\sigma$ CZK16、CZK12(右岸)以及  $\sigma$ PD62(河谷)采用了水压致裂法、深孔解除三维地应力测试法及浅孔解除三维地应力测试法。各测点的布置如图 3、4 所示。

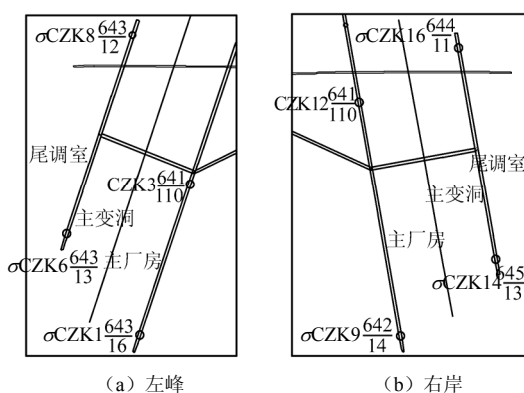


图 3 左、右岸测点示意图  
Fig.3 Sketch map of measuring points

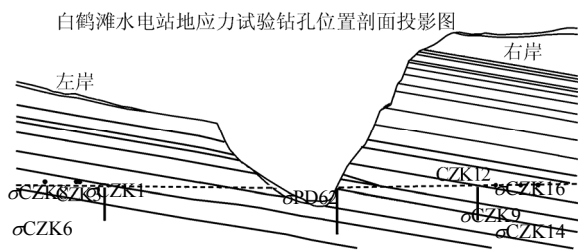


图 4 测点剖面图  
Fig.4 Section plan of measuring points

#### 4.1 水压致裂法

现场对 CZK3、CZK12 和  $\sigma$ PD62(河谷) 3 个钻孔进行了水压致裂法地应力测试，应力随埋深的变化参见图 5。CZK3 孔在 24.8~104 m 测试深度范围的最大水平主应力为 5.6~15.2 MPa，各测点自重应力范围为 7.5~9.6 MPa。CZK12 孔在 33.5~95.3 m 深度范围的最大水平主应力为 7.0~19.5 MPa。各测点自重应力范围为 13.9~15.6 MPa。 $\sigma$ PD62 孔在 67.7~137.5 m 深度范围的最大水平主应力为 6.8~14.7 MPa，自重应力范围为 3.4~5.2 MPa。 $\sigma$ PD62 孔布置在平硐 62 洞口部位位于河谷区，在孔深 110~130 m 存在较为明显的应力集中现象。

现场实测值反映左、右两岸的最大主应力方向为 NNE~NEE，河谷最大主应力方向为 NWW。

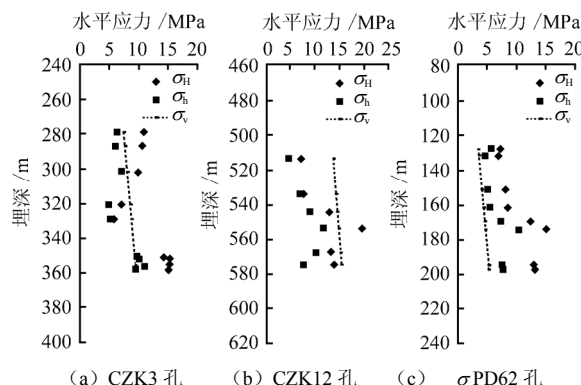


图 5 水压致裂法水平主应力量值与埋深关系图  
Fig.5 Curves of horizontal stress vs. embedded depth by hydraulic fracturing technique

#### 4.2 深孔解除三维地应力法

由于白鹤滩厂区地质复杂，大部分岩芯较为破碎，测试成功率很低，为此仅对 CZK12 和  $\sigma$ PD62 进行了测试，测试结果(见图 6)。CZK12 孔测试所获得的空间主应力中，最大主应力为陡倾角，多数走向为 NWW~SEE；最大水平主应力方位较为稳定，为 22°~44°，属 NEE-NE 向。 $\sigma$ PD62 孔测试所获得的空间主应力中，最大主应力为缓倾角，多数走向为 NWW~SEE；最大水平主应力方位为 296°~306°，属 NWW 向，各测点方位较为接近，水平主应力量值与埋深关系曲线见图 6。

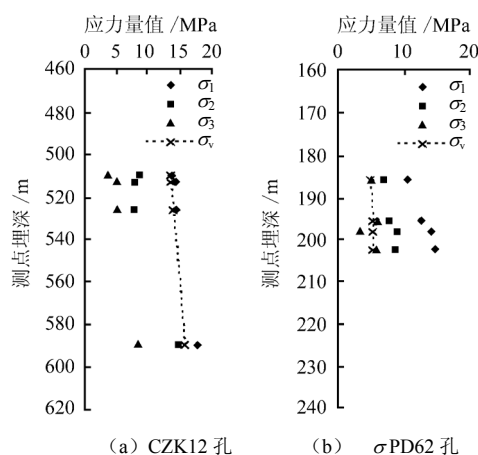


图 6 深孔解除法水平主应力量值与埋深关系图  
Fig.6 Curves of horizontal stress vs. embedded depth by deep hole relief method

#### 4.3 浅孔解除三维地应力法

对  $\sigma$ CZK1、 $\sigma$ CZK6、 $\sigma$ CZK8、 $\sigma$ CZK9、 $\sigma$ CZK14、 $\sigma$ CZK16 共 6 个钻孔采用澳大利亚 CSIRO HI CELL

应变计进行了浅孔解除法地应力测试, 应力的方向和方向见表1(包括其他两种测量方法)。由于右岸厂区内覆岩体厚度大于左岸, 因此, 整体的应力水平高于左岸, 左岸 PD61 平洞中  $\sigma_{CZK1}$ 、 $\sigma_{CZK6}$ 、

$\sigma_{CZK8}$  孔测得的最大水平主应力方位为  $60^\circ \sim 109^\circ$ , 基本为 NEE~NE 向。右岸 PD62 平洞中  $\sigma_{CZK9}$ 、 $\sigma_{CZK14}$ 、 $\sigma_{CZK16}$  孔测得的最大水平主应力方位为  $52^\circ \sim 81^\circ$ , 基本以 NEE 向为主。

表1 实测应力(单位: MPa)  
Table 1 Observed stresses (unit: MPa)

测试方法	孔号	测点高程 /m	测点埋深 /m	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{yz}$	$\sigma_{zx}$	最大水平主应力	最小水平主应力	水平主应力方位 /( $^\circ$ )
浅孔解除法	$\sigma_{CZK1}$	643.4	281.0	5.90	14.8	7.80	1.4	-1.1	-0.7	15.1	5.7	81
	$\sigma_{CZK6}$	643.0	290.0	8.30	16.4	8.40	4.7	1.6	1.3	18.5	6.20	66
	$\sigma_{CZK8}$	642.9	320.0	11.9	13.2	8.40	1.1	6.6	-0.3	13.8	11.3	60
	$\sigma_{CZK9}$	642.9	403.0	15.1	22.8	10.1	3.0	-2.5	-3.4	23.9	14.1	71
	$\sigma_{CZK14}$	644.9	442.0	13.2	18.6	10.8	4.9	-1.3	-3.2	21.5	10.3	59
水压致裂法	$\sigma_{CZK16}$	644.3	513.0	14.6	17.1	12.5	4.9	-1.0	-3.1	20.9	10.8	52
	CZK3	542.9	352.0			9.40				15.2	10.0	54
	CZK12	546.0	575.3			15.6				13.8	7.80	33
深孔解除法	$\sigma_{PD62}$	554.0	127.7			3.40				7.20	5.70	281
	CZK12	589.6	531.7	12.3	12.2	16.3	-2.5	2.7	1.7	14.5	9.70	44
	$\sigma_{PD62}$	186.0	591.5	6.70	9.50	5.40	1.7	0.3	-1.0	10.3	5.90	296

注: 方位角以正北顺时针向为正。

#### 4.4 测区应力场特征分析

三种方法的测试结果显示: 工程区应力量级总体为中偏高等水平。由于右岸上覆岩体厚度大于左岸, 因此右岸地应力的量值高于左岸, 而河谷附近地应力的应力集中现象要达到 110~130 m 才能明显出现, 这与其他工程在深度 20~30 m 附近出现应力集中现象相比, 具有一定的特殊性。另外, 3 种方法在不同测点的测值基本上反映出应力量值与岩石埋深的梯度关系, 但地应力的量值上仍具有一定的离散性与差异性。而地应力方向则更具有较大差异性, 甚至同一种测量法在同一孔内都难以相互验证。根据现场地质的初步分析, 这一现象主要是由于厂区附近的岩体以柱状节理玄武岩为主, 岩体本身存在原生裂隙, 岩体易破碎, 导致各种方法都难以准确测量; 另外柱状节理玄武岩是火山熔岩喷发冷却固结而成, 在这一过程中, 由于温度变化产生的应力至今仍残留在岩体内部(现场 115# 探洞在埋深 50 m 附近围岩仍会产生片帮现象), 这样导致在局部地应力产生突变。与区域地质构造分析的结果对比发现, 河谷处地应力的测定方向与地质构造分析结果十分接近, 但左、右地应力场出现了由 NWW 向到 NE 向较大的偏转, 根据目前初步分析主要是由于河流侵蚀和岸坡卸荷等作地质运动作用而形成。

## 5 现场片帮分析

现场探洞内的片帮是一种直观反映地应力场

的工程现象, 本文以右岸为例, 根据 PD62 探洞内的片帮现象分析判断右岸地应力场的方向。图 7 中黑色圆点区域为右岸探洞内片帮和岩爆发生较为严重区域, 其中 PD62-1 探洞中的片帮现象为 4 个支洞中最为严重的。

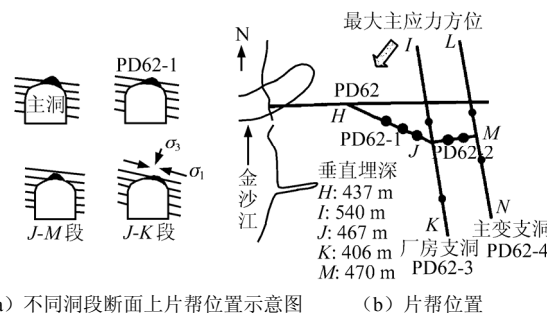


图7 片帮位置  
Fig.7 Location of spallings

片帮在平洞断面上的位置和片帮的程度可靠地反映了地应力场基本特征, 一般情况下, 片帮所在位置的切向方向与断面上最大主应力方向一致, 片帮的程度可以说明断面上最大和最小主应力的差别大小。根据现场的观测, 探洞内的片帮主要出现在拱顶部位, 可以初步判断最大主应力应近水平向, 最小主应力近竖直向; 另外 PD62-1 和 PD62-2 探洞中的片帮现象为 4 个支洞中最为严重的, 其中 PD62-2 支洞中受到岩性的影响以及受其他支洞开挖的影响, 周围应力场出现了转变, 因此, 其片帮现象不能准确反映地应力场的方向, 通过 PD62-1

探洞中的片帮现象可以初步判断水平向最大主应力应接近支洞走向的垂直方向。上述判断与地应力的现场测量较为吻合，因此，可以认为，白鹤滩厂区地应力场的最大主应力以水平向为主，方向近 NE 向。

## 6 初始地应力场回归分析

为了能够为地下洞室群的稳定计算提供较为准确的位移边界条件，结合上述理论分析、现场测量以及工程现象的判断对厂区的地应力场进行回归分析。

### 6.1 地表侵蚀卸荷的模拟

白鹤滩水电站厂区属于显著的深切峡谷地形，其地应力场是在区域地应力场基础上随着河谷形成过程中地表剥蚀、河谷侵蚀等地质作用产生的长期卸荷的结果，这种卸荷作用破坏了河谷形成前岩体的相对平衡状态，导致岩体内应力、应变及能量调整，并达到新的平衡状态。对于这种深切峡谷地形，模拟的主要过程如下：

(1) 根据计算目的需要，选取合适的计算范围，根据地质勘测资料，建立三维模型，并在现有地形的基础上，建立远古前的较为平坦的地表。

(2) 根据地质构造的判断，左、右岸最大主应力产生了偏转，因此，确立 4 种边界条件，如图 8 所示。

(3) 采用开挖模拟河流对地表的侵蚀。

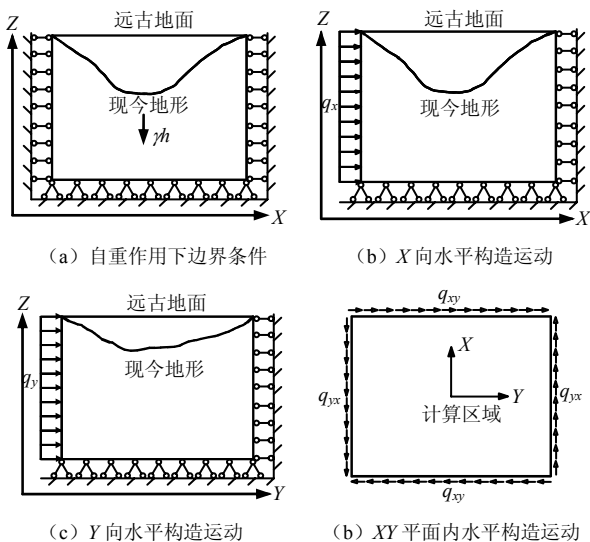


图 8 模拟过程  
Fig.8 Simulation process

### 6.2 右岸地应力场模型与岩体参数

根据右岸现有地形建立右岸三维地应力场模型，其模型原点在大地坐标 ( $X_{地}-O-Y_{地}$ ) 的位置为： $X_0=3\ 011\ 985.7$ ， $Y_0=589\ 552.6$ ，竖直方向从海拔 130 m 到山顶。三个坐标的方位为：Y 轴为 N10°W，

X 轴为 N80°E，Z 轴与大地坐标重合。模型中主要考虑了层间错动带 C5、C4、C3、C3-1 以及断层 F16、F19、F20 的地质构造因素，并采用弱化的实体单元进行模拟。模型共计 66 066 个节点，376 075 个单元。地表的侵蚀模型参见图 9，岩体的计算参数参见表 2。

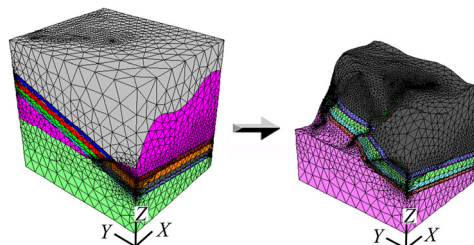


图 9 地表侵蚀模型  
Fig.9 Model of terrestrial erosion

表 2 岩体力学参数

介质类型	变形模量 /GPa	泊松比	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	抗拉强度 /MPa	重度 /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
岩体	10.0	0.25	1.00	45	0.1	26
断层	1.00	0.30	0.10	25	0.0	20
错动带	0.25	0.32	0.03	15	0.0	20

### 6.3 神经网络反演

初始应力场反分析时，根据所利用基础信息不同，反分析法可分为应力反分析法、位移反分析法和混合反分析法等，其中位移反分析法为最常见的反分析方法<sup>[5-11]</sup>。本文以位移反分析法为基础，利用神经网络对施加在各边界的位移条件进行反演。由于神经网络具有很好的非线性映射功能，特别针对多参数反演具有很好的适应性，具体的反演过程参见文献[2]。通过敏感性分析确定了神经网络的训练样本参见表 3。

表 3 神经网络训练样本  
Table 3 Training samples of neural network

样本序号	xx/cm	yy/cm	xy/cm	yx/cm	重力修正系数
1	6.00	1.50	-2.00	-3.00	1.20
2	6.50	2.00	-3.00	-2.00	1.10
3	7.00	2.00	-1.25	-0.75	0.85
4	7.50	2.00	-1.50	-0.50	1.00
5	8.00	2.00	-2.00	-3.00	1.20
6	8.50	2.50	-1.50	-1.50	1.00
7	9.00	1.50	-1.00	-1.50	0.95
8	9.50	2.00	-1.25	-0.75	0.85
9	10.00	1.50	-1.00	-1.50	0.95
10	11.00	3.50	-1.25	-0.75	1.10
11	12.00	4.00	-1.00	-1.50	0.95
12	13.00	3.50	-1.50	-0.50	1.00
13	14.00	4.00	-3.00	-2.00	1.10
14	8.00	3.00	-1.00	-1.50	0.95
15	9.00	2.00	-1.25	-0.75	1.00

将上述均匀设计得到的边界条件的各组样本方案输入 FLAC 进行计算, 获得每个样本的 6 个测点处的应力计算值, 作为神经网络的学习训练输入值, 而将设定的边界条件作为对应输出值, 建立测点应力分量和边界条件非线性映射关系的进化神经网络模型。在这一过程中, 在网络训练时采用 BP 网络的改进方法—有动量和自适应 lr 的梯度下降法 (traingdx), 通过调整网络结构, 确定了 20-30-20-30-30-20-30-20-30 的隐含层。通过 500 步的训练, 网络精度到达 0.001。其中 14 组和 15 组作为检验样本。

#### 6.4 反演结果

将现场  $\sigma_{CZK9}$ 、 $\sigma_{CZK14}$  和  $\sigma_{CZK16}$  的实测值输入网络中, 反演得到边界条件如下:

表 4 反演的边界条件

Table 4 Boundary conditions of back analysis

反演参数	xx/cm	yy/cm	xy/cm	yx/cm	重力修正系数
反演值	11.97	2.19	-1.85	-0.64	1.05

将反演得到的边界条件赋予 FLAC 的模型中, 通过模拟河谷下切, 得到了模拟的初始地应力场。模型中实测点的应力与现场实测值的比较参见表 5。

表 5 应力实测值与反演值的比较

Table 5 Comparison between observed stresses and those obtained by back analysis

孔号	竖直应力 /MPa	最大水平主应力 /MPa	最小水平主应力 /MPa	水平主应力方位 /( $^{\circ}$ )	
$\sigma_{CZK9}$	实测值	10.1	23.9	14.1	71
	计算值	10.0	21.9	13.7	62
$\sigma_{CZK14}$	实测值	10.8	21.5	10.3	59
	计算值	10.8	19.9	12.2	64
$\sigma_{CZK16}$	实测值	12.5	20.9	10.8	52
	计算值	12.9	22.3	14.4	61

通过比较可以发现: 水平向最大主应力的计算值与实测值的最大相对误差为 6.9%, 水平向最小主应力的计算值与实测值的最大相对误差为 33.3%。由于现场地应力的测量值具有一定的离散性, 使得回归值与实测值存在一定的相对误差; 回归分析的水平向最大主应力方位角以  $N62^{\circ}E$  为主, 各测点的实测值与回归值的误差基本小于  $10^{\circ}$ 。所以依据地质构造分析和片帮现象分析地应力场的成因, 利用敏感性分析确立待反演参数, 借助神经网络回归反

演地应力场的方法是合理的, 可行的。

## 7 结 语

根据地质构造作用的分析, 厂区一带的初始地应力场受喜山期和川滇菱形地质构造作用的影响, 在西昌-宁南一带形成 NWW 向挤压应力场, 在河谷附近测得的初始地应力场的方向验证了这一现象。而现场的地应力测量和探洞内的片帮现象说明地应力场受到河谷侵蚀和岸坡卸荷作用的影响在局部出现了偏转。依据现场实测值和地质现象分析, 确定影响初始地应力的主要边界条件, 并借助 FLAC 与神经网络对边界条件进行反演。通过反演值与实测值的比较, 验证了回归边界条件的准确性, 可以为后续洞室群的围岩稳定分析提供边界条件, 同时也说明地应力场的反演回归是需要多种方法综合判断, 凭借一种方法是难以准确获得的。

## 参 考 文 献

- [1] 徐志雄, 周创兵, 陈益峰, 等. 基于  $\nu$ -SVR 和 GA 的初始地应力场位移反分析方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 151-156.  
XU Zhi-xiong, ZHOU Chuang-bing, CHEN Yi-feng, et al. Study on  $\nu$ -SVR and modified GA in back analysis of initial stress fields from displacements[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 151-156.
- [2] 金长宇, 马震岳, 张运良, 等. 神经网络在岩体力学参数和地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1263-1266.  
JIN Chang-yu, MA Zhen-yue, ZHANG Yun-liang, et al. Application of neural network to back analysis of mechanical parameters and initial stress field of rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1263-1266.
- [3] 水利水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究选坝阶段柱状节理玄武岩专题研究工程地质报告[R]. 杭州: 华东勘测设计研究院.
- [4] 长江水利委员会长江科学院. 金沙江白鹤滩水电站坝址区地应力场数值模拟研究[R]. 武汉: 长江水利委员会长江科学院.
- [5] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [6] 冯夏庭. 智能岩体力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

- soils[C]//Proceedings of British 5th Laterite Institute Civil Engineering, London: [s. n.], 1957, 8: 253—292.
- [5] ACKROYD L W. Engineering classification of some western nigerian soils and their qualities in road building[R]. British: Road Research Laboratory, 1959, 10: 32
- [6] HAMMOND A A. A study of some lateritic gravels from kumasi district[R]. Kumasi, Ghana: Build Road Research Institute, 1970.
- [7] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特征与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369—373.  
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 369—373.
- [8] DEGRAFT-JOHNSON J W, BHATIA H S, YEBOA S L. Influence of geology and physical properties on strength characteristics of lateritic gravels for road pavements[R]. Washington: Highway Research Board, 1972, 405: 87—104.
- [9] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.  
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732.
- [10] 余飞, 陈善雄. 膨胀土 CBR 强度特性机制分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1113—1117.  
YU Fei, CHEN Shan-xiong. Characteristics and mechanism of California bearing ratio of expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1113—1117.
- [11] 孔令伟, 郭爱国, 陈善雄, 等. 膨胀土的承载强度特征与机制[J]. 水利学报, 2004, (11): 54—61.  
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, CHEN Shan-xiong, et al. CBR strength characteristics and mechanism analysis of expansive soils[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (11): 54—61.
- [12] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改性膨胀土施工最优含水率确定方法探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 517—521.  
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 517—521.
- [13] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568—572.  
ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 568—572.

---

#### 上接第 850 页

- [7] 葛宏伟, 梁艳春, 刘玮, 等. 人工神经网络与遗传算法在岩石力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1542—1550.  
GE Hong-wei, LIANG Yan-chun, LIU Wei, et al. Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to rock mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1542—1550.
- [8] 贾超, 刘宁, 肖树芳. 洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 450—454.  
JIA Chao, LIU Ning, XIAO Shu-fang. Application of direct displacement inverse analysis to rockmass parameters of caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 450—454.
- [9] 蒋中明, 徐卫亚, 邵建富. 基于人工神经网络的初始地应力场三维反分析[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 52—56.  
JIANG Zhong-ming, XU Wei-ya, SHAO Jian-fu. ANN-based 3-D back analysis of initial stress in rock masses[J]. **Journal of Hohai University**, 2002, 30(3): 52—56.
- [10] 郭明伟, 李春光, 王水林, 等. 优化位移边界反演三维初始地应力场研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1269—1274.  
GUO Ming-wei, LI Chun-guang, WANG Shui-lin, et al. Study on inverse analysis of 3-D initial geostress field with optimized displacement boundaries[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1269—1274.
- [11] 贾善坡, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 大岗山水电站地下厂房区初始地应力场 Nelder-Mead 优化反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2341—2349.  
JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, et al. Nelder-Mead algorithm for inversion analysis of in-situ stress field of underground powerhouse area of Dagangshan Hydropower Station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2341—2349.