

DOI: 10.11779/CJGE20240135

考虑层状构造特征影响的岩体地应力场精细反演分析研究

赵 勐¹, 钮新强¹, 颜天佑², 肖 明³

(1. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;

3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 层状岩体及其层间剪切破碎带对厂址局部地应力场的量值和方向具有十分复杂的影响, 准确获取复杂地质条件下厂址初始地应力场条件是分析层状岩体地下洞室围岩稳定性的先决条件, 故提出考虑层状岩体对局部地应力场影响的二次反演分析方法。首先, 针对影响地应力场规律的复杂河谷演化过程、地形地貌和构造作用等因素, 发展了基于地层剥蚀模拟的侧压力系数法进行一次反演计算, 得到大模型初始地应力场。其次, 针对层状各向异性构造岩体对局部应力场的影响, 建立层状岩体二次反演模型, 并从一次反演应力场中插值计算等效节点力荷载来模拟构造作用, 提出了基于等效构造作用的层状岩体地应力场二次反演方法。结合一次和二次反演方法, 形成了层状岩体三维初始地应力场优化反演分析方法。最后, 将该反演分析方法运用于贵阳抽水蓄能水电站地下厂房中, 二次反演结果表明: 计算得到的地应力场结果能够满足实测点处吻合和反映河谷演化和层状岩体影响的场吻合要求; 工程区地应力场受层面的影响, 在层间剪切带边缘局部应力值稍有增加, 软岩层内应力释放明显, 且局部应力场方向受岩层产状变化而发生不同程度的偏转扰动; 深入分析了层状岩体各向异性力学性质对局部地应力场量值、方向和扰动范围的影响规律。

关键词: 地应力场; 反演分析; 侧压力系数法; 层状岩体; 地下洞室

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)06-1239-10

作者简介: 赵 勐(1994—), 男, 博士, 主要从事地下洞室围岩稳定数值计算方面的研究工作。E-mail: zhaomeng@cjwsjy.com.cn。

Inverse analysis method for in-situ stress field of rock mass considering influences of characteristics of layered structure

ZHAO Meng¹, NIU Xinqiang¹, YAN Tianyou², XIAO Ming³

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Survey, Planning, Design and

Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University,

Wuhan 430072, China)

Abstract: The layered rock mass and its interlayer shearing fracture zone have complex influences on the magnitude and direction of local stress field in underground engineering areas. Obtaining the initial in-situ stress field under complex geological conditions is the prerequisite for analyzing the stability of surrounding rock of underground caverns in layered rock mass. Firstly, aiming at the influences of evolution process, topography and tectonic action of a complex valley, a lateral pressure coefficient method based on the stratum denudation simulation is proposed for the first-stage inversion and the initial ground stress field of big model is obtained. Secondly, based on the influences of layered rock mass on local stress field, a second-stage inverse model for layered rock mass is established. The equivalent tectonic loads are obtained by the stress field calculated by interpolation from the big model, and the second-stage inverse analysis method based on the equivalent tectonic loads is proposed. Combined with the first and the second inverse methods, the optimal inverse analysis method for the three-dimensional initial in-situ stress field of layered rock mass is formed. Finally, the in-situ stress field of underground cavern of Guiyang pumped storage hydroelectric plant is inverted on account of the measured in-situ stress data. The

基金项目: 水利部重大科技项目 (SKS-2022103); 国家自然科学基金项目 (52179118); 云南省重大科技专项计划项目 (202002AF080003)
收稿日期: 2024-02-19

*通信作者 (E-mail: niuxinqiang@cjwsjy.com.cn)

secondary inverse results indicate that the inverse values of the in-situ stress field can meet the requirements of point coincidence at the measuring points and field coincidence reflecting the evolution process of the valley and influences of the layered rock mass. The local stress field in underground engineering areas is significantly affected by the interlayer shearing fracture zone, which is mainly manifested in the following aspects: (1) The local stress value increases slightly near the interface and releases in the soft rock layer. (2) The direction of the local stress field deflects differently due to change of the occurrence of rock strata. Using the proposed method, the influences of anisotropic mechanical properties of layered rock mass on the magnitude, direction and disturbance range of local in-situ stress field are deeply analyzed.

Key words: in-situ stress field; inverse analysis; lateral pressure coefficient; layered rock mass; underground cavern

0 引言

岩体初始地应力场是进行地下洞室数值模拟计算和围岩稳定性分析的主要输入参数之一。由于层状岩体分布的广泛性,中国西南地区大型地下工程建设不可避免地遇到层状岩体地下洞室围岩稳定性问题,尤其是软硬相间互层岩体及层间剪切带控制型围岩稳定性问题越来越明显^[1]。对于具有层状构造特征岩体,尤其是软硬相间层状岩体,其力学性质在垂直和平行于层面的两个方向上明显不同,具有横观各向同性体的特征。现有的初始地应力场反演分析方法在模拟软弱地质构造如断层对局部应力场的影响时,常常假定为弹性各向同性体,忽略了其不同方向上力学特性不同对地应力场的影响,对局部地应力场量值或者方向的反演精度有待提高^[2-3]。因此,研究采用何种有效的反演分析方法来考虑层状岩体对局部地应力场分布规律的影响,是进行结构面控制型地下洞室围岩稳定性分析的重要基础。

针对考虑软弱地质构造影响的地应力场反演分析方法已有一些研究成果。Li 等^[4]针对缺失实测地应力数据情况,通过引入位移不连续法,建立了能够考虑断裂构造扰动的初始地应力场回归反演方法;张勇慧等^[5]考虑了地形地貌和软弱地质构造的影响,采用多元回归方法分析大岗山地下厂房区三维地应力场分布特征;余大军等^[6]将 FLAC^{3D} 横观各向同性弹性模型与多元线性回归法相结合,研究了具有层状构造的煤系地层力学性质的方向差异性,提升了层状岩体地应力场反演精度;赵辰等^[7]建立了考虑地层剥蚀模拟、岩体力学性质和断层结构影响的侧压力系数法,并运用到澜沧江托巴水电站地下厂房地应力反演中;张志增^[8]采用位移反分析法来反演横观各向同性岩体地应力场;颜天佑等^[9]采用多元回归三维数值计算反演了滇中引水香炉山隧洞穿越龙蟠—乔后活动断层区域的地应力场;陈世杰等^[10]通过侧压力系数法一次反演大模型应力场,再对含断层小模型进行二次反演来研究断层对局部应力场方向的扰动规律;裴启涛等^[11]通过

建立精细化子模型,采用智能算法对边界参数进行优化,进行二次反演来考虑局部地质构造的影响。综上所述,地应力场一次反演分析方法虽然计算效率越来越高,但是对考虑复杂地质构造(如层状岩体)的影响研究相对较少。二次反演分析方法能够同时兼顾河谷演化、地形地貌特征和层状岩体等软弱地质构造的影响,但也存在有限元模型边界条件复杂、确定困难等问题。此外,对于层状岩体,在反演分析时常对其特殊的层状各向异性构造特征考虑不足,特别是多层构造的互层状岩体。

本文以工程区分布较为广泛的层状岩体为研究对象,首先针对复杂河谷地形的影响,将侧压力系数法与地层剥蚀模拟相结合并拟合得到一次反演大模型的地应力场。在此基础上,建立层状岩体精细化小模型,根据一次反演应力场插值计算出小模型网格节点的等效构造作用力,基于弹塑性理论进行层状岩体三维地应力场的二次反演计算。以贵阳抽水蓄能水电站为工程实例,根据实测地应力数据进行地应力场反演分析,并研究了层状岩体附近地应力场分布规律,反演结果能够满足地应力场点吻合和场吻合的要求,较好地反映了层状岩体及其层间剪切带附近局部地应力场的不均匀特征。

1 三维初始地应力场反演分析方法

1.1 基于侧压力系数法的地应力场有限元反演

在河谷形成前,远古时期地表无明显起伏,但测点上的实测值是现今地貌形成后的值,因此需要根据现今的实测值反算出远古时期在相同位置处的应力值。现今初始应力场的形成基于以下两点假设^[12]:

(1) 假定远古时期地面是无明显起伏的平地,其岩体地应力场由岩体自重应力场和区域构造应力场构成,且构造运动在远古时期已经完成;

(2) 现今地应力场是在远古时期地应力场的基础上由地层剥蚀、河谷下切和地质构造运动等卸荷作用逐渐形成。

根据上述假定内容, 在反算远古时期应力场实测点处侧压力系数及应力量值时, 须对各实测点分别单独进行反算。假设各测点对应的远古应力场是均匀分布的, 则远古时期初始地应力场的 6 个应力分量可表示为

$$\sigma_i^0(x, y, z) = K_i^0 \gamma H^0 \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中: $\sigma_i^0(x, y, z)$ 为远古应力场的 6 个应力分量; x, y, z 为坐标值; K_i^0 为远古应力场 6 个应力分量对应的侧压力系数, 为待定系数; γ 为岩体的重度; H^0 为计算点在远古时期的埋深。

根据现今地应力场形成过程的基本假设, 若忽略岩体在漫长地质作用过程中的塑性蠕变影响, 只需要假定一个合理的远古时期地应力场, 则可采用三维弹塑性有限元对山体地形进行逐层开挖计算的方式模拟现今河谷的形成。针对三维弹塑性有限元反演得到的离散初始应力点, 可根据精度要求拟合出一个能够反映整体空间地应力场的应力函数。为提高拟合的精度, 采用三维正交多项式来拟合测点处的应力分量侧压力系数。

根据三维有限元反演应力场 n 个离散点 (x_r, y_r, z_r) , 其中, $r=1, 2, \dots, n, n=N+N', N$ 为实测点点数, N' 为插值点点数, 采用三维正交多项式对应应力分量侧压力系数函数进行拟合, 即在 n 个有限离散点处, 构造一组 m 个三维多项式序列 $P_0(x, y, z), P_1(x, y, z), \dots, P_m(x, y, z) (m < n)$ 满足如下所示的正交条件:

$$\sum_{r=1}^n P_i(x_r, y_r, z_r) P_j(x_r, y_r, z_r) = \begin{cases} R & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (2)$$

根据三维正交多项式的基本性质和地应力场沿 z 轴变化较大的特点, 可以采用如下三维正交多项式序列:

$$\left. \begin{aligned} P_{-3} &= P_{-2} = P_{-1} = 0, \\ P_0(x, y, z) &= 1, \\ P_1(x, y, z) &= (z - a_1)P_0, \\ P_2(x, y, z) &= (z - a_2)P_1 + (x - b_2)P_0, \\ P_3(x, y, z) &= (z - a_3)P_2 + (x - b_3)P_1 + (y - c_3)P_0, \\ P_4(x, y, z) &= (z - a_4)P_3 + (x - b_4)P_2 + (y - c_4)P_1 + d_4P_0, \\ &\vdots \\ P_{i+1}(x, y, z) &= (z - a_{i+1})P_i + (x - b_{i+1})P_{i-1} + (y - c_{i+1})P_{i-2} + d_{i+1}P_{i-3} \\ &(i=1, 2, \dots, m-1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $a_{i+1}, b_{i+1}, c_{i+1}, d_{i+1}$ 为多项式待定常数, 可以根据正交多项式的性质, 基于数学归纳法的原理求解得到

$$\left. \begin{aligned} a_{i+1} &= \sum_{r=1}^n (z_r P_i + x_r P_{i-1} + y_r P_{i-2}) P_i / \sum_{r=1}^n P_i^2, \\ b_{i+1} &= \sum_{r=1}^n (z_r P_i + x_r P_{i-1} + y_r P_{i-2}) P_{i-1} / \sum_{r=1}^n P_{i-1}^2, \\ c_{i+1} &= \sum_{r=1}^n (z_r P_i + x_r P_{i-1} + y_r P_{i-2}) P_{i-2} / \sum_{r=1}^n P_{i-2}^2, \\ d_{i+1} &= \sum_{r=1}^n (z_r P_i + x_r P_{i-1} + y_r P_{i-2}) P_{i-3} / \sum_{r=1}^n P_{i-3}^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 可得到一组三维正交多项式序列。根据正交多项式的性质, 对这组三维正交多项式序列 P_0, P_1, \dots, P_m 进行线性组合从而构造出三维空间应力场的侧压力系数函数 $K_i^0(x, y, z)$, 可以表示为

$$K_i^0(x, y, z) = \alpha_{i0} P_0 + \alpha_{i1} P_1 + \alpha_{i2} P_2 + \dots + \alpha_{im} P_m \quad (5)$$

式中: $K_i^0(x, y, z) (i=1, 2, \dots, 6)$ 为 6 个应力分量的侧压力系数函数; $\alpha_{i0}, \alpha_{i1}, \dots, \alpha_{im}$ 为 $m+1$ 个待定系数。对于这 $m+1$ 个待定系数可以根据反演地应力场 n 个空间离散点的侧压力系数值, 基于最小二乘法的原理和正交多项式的特性来求解。

对于式 (5), 由于正交多项式的性质, 可以直接求解待定系数 α_{im} , 从而避免了大型线性方程组的复杂迭代求解过程。为了确定侧压力系数函数, 根据反演地应力场 n 个离散点的侧压力系数值, 其中 $n=N+N', N$ 个实测点的侧压力系数记为 $(k_1, k_2, \dots, k_6)_r (r=1, 2, \dots, N), N'$ 个插值点的侧压力系数记为 $(g_1, g_2, \dots, g_6)_r (r=N+1, N+2, \dots, n)$, 可以建立一个以实测点的侧压力系数为极值条件的目标多元函数:

$$F_i(\alpha_{is}, \lambda_{ir}) = \sum_{r=N+1}^n [K_i^0(x_r, y_r, z_r) - (g_i)_r]^2 + \sum_{r=1}^N [K_i^0(x_r, y_r, z_r) - (k_i)_r] \lambda_{ir} \quad (6)$$

式中: $s=0, 1, \dots, m$, 表示 $m+1$ 个正交多项式基函数的待定系数 $\alpha_{is}; i=1, 2, \dots, 6$, 表示 6 个应力分量的侧压力系数函数; $r=1, 2, \dots, n$, 表示应力场空间 n 个离散点; $(g_i)_r$ 表示第 r 个插值点处第 i 个应力分量的侧压力系数值; $(k_i)_r$ 表示第 r 个实测应力点处第 i 个应力分量的侧压力系数值; λ_{ir} 表示第 r 个实测点处第 i 个侧压力系数的极值条件的待定系数, 为 $6N$ 个未知的拉格朗日乘数。

基于最小二乘拟合的原理对目标多元函数 $F_i(\alpha_{is}, \lambda_{ir})$ 求极值, 由 $\partial F_i(\alpha_{is}, \lambda_{ir}) / \partial \alpha_{is} = 0$ 可求得待定系数 α_{is} 为

$$\alpha_{is} = \frac{\sum_{r=N+1}^n (g_i)_r P_s(x_r, y_r, z_r) - 0.5 \sum_{r=1}^N \lambda_{ir} P_s(x_r, y_r, z_r)}{\sum_{r=N+1}^n P_s^2(x_r, y_r, z_r)} \quad (7)$$

根据侧压力系数函数在实测点处等于实测值的条件,可以建立 $6N$ 个方程,如下所示:

$$\sum_{s=0}^m \alpha_{is} P_s(x_r, y_r, z_r) = (k_i)_r \quad (i=1,2,\dots,6; r=1,2,\dots,N) \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)则可建立得 $6N$ 个以 λ_{ir} 为未知数的线性方程组,求解该方程组可得 $6N$ 个拉格朗日乘数 λ_{ir} 的值,再将已求得的 λ_{ir} 代入式(7)中可求解所有待定系数 α_{is} 的值,由此可确定三维初始地应力场侧压力系数函数 $K_i^0(x, y, z)$ 。继而根据式(1)可得到远古时期整个三维初始地应力场的应力分布。

1.2 复杂初始地应力场的平衡与加载方法

当得到远古时期的初始地应力场后,还需要将其以“零”位移场的状态加载至有限元模型中,即地应力场平衡^[13],以便进行后续三维非线性有限元反演开挖模拟计算,得到现今河谷地应力场。

在三维有限元分析中,针对具体的初始地应力场反演问题,可将岩体中由于造山运动形成的地应力按初应力考虑,根据广义胡克定律,将初始地应力看作是外力作用,可得如下平衡方程:

$$KU = P = P_f + P_s + P_{\sigma_0} \quad (9)$$

式中: K 为结构整体刚度矩阵; U 为结构结点位移向量; P 为结构结点荷载向量,其中, P_f 为和作用于单元的体积力 f 等效的结点荷载向量, P_s 为和作用于单元的边界分布力 T 等效的结点荷载向量, P_{σ_0} 为和作用于单元内的初始地应力 σ_0 等效的结点荷载向量。它们分别为

$$\left. \begin{aligned} P_f &= \sum_e \left(\int_{V_e} N^T f dV \right), \\ P_s &= \sum_e \left(\int_{S_e} N^T T dS \right), \\ P_{\sigma_0} &= - \sum_e \left(\int_{V_e} B^T \sigma_0 dV \right). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: N 为形函数矩阵; B 为应变矩阵; f 为自重荷载向量, $f=[0 \ 0 \ -\rho g]^T$; σ_0 为初始地应力向量, $\sigma_0=[\sigma_{0x} \ \sigma_{0y} \ \sigma_{0z} \ \tau_{0xy} \ \tau_{0yz} \ \tau_{0zx}]^T$; T 为作用在三维体边界 S_e 上的面积力向量,即构造作用荷载; V_e 为单元体积; $\sum_e(\bullet)$ 表示对环绕结点 i 的所有单元的集成。

由于初始地应力场可根据 1.1 节的拟合方法获得,岩体的自重荷载可根据工程区现场地勘资料较为准确的计算确定,因而只有构造作用荷载无法直接确定。模拟构造作用荷载的传统做法是通过施加边界条件使得模型内部应力处于一种平衡状态。郭运华等^[14]提出在 FLAC^{3D} 中对模型网格结点施加与不平衡力相等且

反向的结点荷载,实现结点力的平衡并完成地应力场的精确加载。本文参考上述方法来模拟构造作用荷载,即直接对有限元计算模型中的网格结点施加满足平衡的外荷载。根据“零”位移场的输入要求,当有限元模型的任一结点 i 处于平衡状态时,令式(9)中 $U=0$,则:

$$P_s = -P_f - P_{\sigma_0} = - \sum_e \left(\int_{V_e} N^T f dV \right) + \sum_e \left(\int_{V_e} B^T \sigma_0 dV \right) \quad (11)$$

式(11)中等效构造作用荷载 P_s 是根据已知的自重荷载和初始地应力场通过单元数值积分和集成获得,因此可以与外荷载(体力和边界力)相平衡。在上述计算 P_s 的过程中,并未考虑模型边界的位移约束条件,可根据后续结构计算模型的边界条件确定,将结点被约束了位移方向的结点荷载修改为 0,以形成最终用于初始地应力场平衡的结点荷载向量 P'_s 。将 P'_s 代入平衡方程式(9)中进行迭代计算便完成三维初始地应力场的平衡与加载。

完成平衡计算后,采用有限元方法对远古时期地层进行分期开挖计算,模拟河谷剥蚀作用,得到现今河谷地应力场。三维初始地应力场的一次反演计算流程见图 1。

2 考虑层状岩体影响的地应力场二次反演分析

在工程实际中,层状岩体由于受区域构造应力的影响,层间剪切、挤压破碎带较为常见,且层状岩体中软弱岩层的层面物理力学特性和几何特性的变化均会对工程区局部地应力场的量值大小、方向和扰动范围均有显著影响。因此,可以认为在区域构造应力的挤压作用下,层状岩体层间剪切滑动变形达到平衡后的应力场即为层状岩体影响下的三维初始地应力场。因为软弱地质构造只对局部地应力场有较为明显的影响,所以对于包含层间剪切带的层状岩体应力场可看作层间发生剪切变形后对区域地应力场的局部调整。故进行层状岩体地应力场二次反演计算的关键在于如何从大模型一次反演结果中插值获取构造作用荷载并加载至层状岩体小模型中。

由于复杂地质构造如层间剪切带等因素影响,子模型法是地应力场局部精细化模拟的主要方法之一^[15]。具体操作方法如下:①从大模型中取出包含层间剪切带的层状岩体关键部位区域,建立精细化二次反演模型;②根据大模型一次反演得到的初始地应力场,用大模型单元形心点的应力值进行形函数插值,

求解小模型未受软弱地质构造影响的初始地应力场;
③根据式 (10) 和式 (11) 分别求解小模型的等效自重荷载向量 $\mathbf{P}_f^{\text{small}}$, 等效初始地应力荷载向量 $\mathbf{P}_{\sigma_0}^{\text{small}}$ 和等效构造作用荷载向量 $\mathbf{P}_s^{\text{small}}$, 需要注意的是所求得 3 种等效结点荷载均是层状岩体层间剪切滑动变形前的作用荷载; ④对小模型施加等效自重荷载 $\mathbf{P}_f^{\text{small}}$ 和等效构造作用荷载 $\mathbf{P}_s^{\text{small}}$, 然后进行三维弹塑性有限元迭代计算, 完成考虑层状岩体影响的三维初始地应力场二次反演分析。

综上所述, 复杂地质条件下层状岩体三维初始地应力场二次反演分析方法的实施流程如图 1 所示。

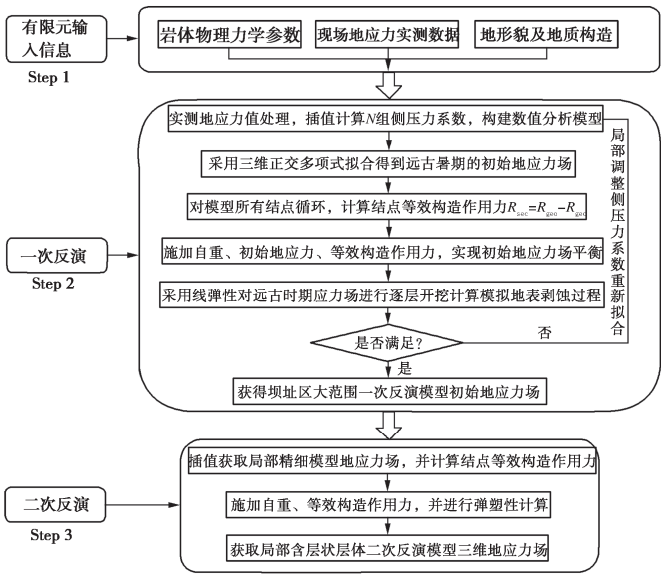


图 1 复杂条件下初始地应力场二次反演流程图

Fig. 1 Flow chart of two-stage inverse analysis method for initial geostress field under complex conditions

3 工程实例

3.1 工程概况及计算模型

贵阳抽水蓄能电站地下厂房位于贵州省乌江支流猫跳河右岸峡谷斜坡地带, 地下厂房洞室群布置于堆积体上游天马山上水库与猫跳河六级红岩下水库之间山体内部。坝址区地处乌江河谷深切的高山峡谷区, 两岸多基岩裸露, 山坡陡峻, 河谷高程为 860~890 m, 两岸山顶高程为 1380~1470 m, 相对高差为 490~610 m, 属中等切割高山区, 基本呈“V”型河谷, 山坡自然坡度 40°~50°。厂房区地表为陡坡及陡崖地形, 地表高程在 1200~1320 m, 厂房洞室埋深在 430~530 m, 处于厚层白云岩夹薄层泥质白云岩(中等岩溶含水透水岩组)和薄至中厚层灰岩、泥灰岩夹钙质泥岩及泥岩(弱岩溶含水透水岩组)地层中, 层状岩体各向异性特征明显, 厚度 10~30 m。

根据设计院提供的工程地质勘察成果, 地应力反

演模型地质分区包括: 强风化岩体, 弱风化岩体和微新岩体, 其中微新岩体层状构造分布特征明显, 岩层主要以Ⅲ类围岩为主, 在强、弱风化和局部地段围岩为Ⅳ类。各类岩体材料及主要结构面的物理力学参数见表 1。

地应力测点平面布置如图 2 所示。前期在地下厂房平硐内的钻孔 CZK2 进行了水压致裂法现场地应力测试, 测试了钻孔 70 m 以下深度的地应力大小和方向。根据测点钻孔岩芯的完整性程度、裂隙发育状况和深度分布等因素, 共成功获得 6 个测试段的数据, 测试成果见表 2。钻孔 CZK2 的水平最大主应力最大值约为 9.30 MPa, 水平最小主应力最大值约为 6.09 MPa, 水平最大主应力的优势方向为 N16°W 左右, 表明工程区现今地应力场分布以 NNW 向挤压为主。

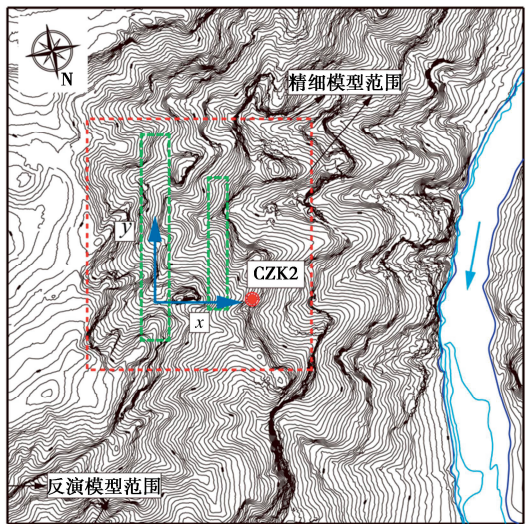


图 2 反演区域及测点平面布置图

Fig. 2 Inverse range and plane location of measuring points

3.2 初始地应力场一次反演分析

根据工程区山体地形地貌特征, 建立包括实测地应力点和地下厂房洞室群区域在内的大范围初始地应力场一次反演模型。大模型主要参照厂房轴线的布置方案确定计算坐标、原点和范围, 如图 3 所示。三维初始地应力场的计算坐标系以#1 机组段中心为坐标原点, x 轴正向为 N78°W, 与主厂房轴线垂直; y 轴正向为 N192°E, 与厂房轴线平行, 从#1 机组指向#4 机组为正; z 轴与大地坐标重合, 竖直向上为正。在 xOy 平面上, x, y 轴的计算范围为 600 m×600 m, 在竖直平面上, z 轴从底部高程 600 m 一直延伸到夷平面 1552 m。一次反演有限元模型采用 8 节点 6 面体单元进行离散, 共划分了 158400 个单元和 167445 个节点, 其相应的模型网格划分见图 3。大模型底部全约束, 四周法向约束, 顶部自由。

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses and faults									
地层岩性	平行变形模量 E_0/GPa	垂直变形模量 E_1/GPa	平行泊松比 μ_0	垂直泊松比 μ_1	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $(^\circ)$	抗拉强度 R_a/MPa	抗压强度 R_b/MPa	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
强风化	2.5	—	0.32	—	0.2	24.3	0.1	10	2.44
弱风化	3	—	0.32	—	0.35	26.3	0.15	15	2.44
微新 \in 1q1-1 灰岩 III1	10	8	0.23	0.27	1.1	47.7	1.75	60	2.70
微新 \in 1q1-2 钙质泥岩 IV	4	3	0.29	0.31	0.5	28.8	0.3	20	2.58
层面	—	—	—	—	0.15	23.3	—	—	—

表 2 厂房区水压致裂法应力测量结果

Table 2 Results of geostress measurement by hydraulic fracturing technique in underground powerhouse area

测段编号	压裂段深度/m	高程/m	应力/MPa			破裂方位 $(^\circ)$
			σ_H	σ_h	σ_v	
1	72.8	828.7	6.94	4.27	9.69	**
2	82.3	819.2	7.21	4.58	9.94	N9°W
3	91.2	810.3	7.92	5.19	10.17	**
4	95.6	805.9	8.33	5.50	10.29	N23°W
5	121.3	780.2	8.89	5.88	10.95	**
6	125.6	775.9	9.30	6.09	11.07	**

注： σ_H 和 σ_h 分别为钻孔截面内水平最大主应力和水平最小主应力； σ_v 为垂直主应力；**表示取水平最大主应力的平均方向，为 N16°W。

初始地应力场一次反演计算时，首先根据实测点的原位地应力值，计算 6 个实测点处应力分量的侧压力系数。由于 6 个测点位于同一钻孔处，可根据山体的地形地貌特征和边界条件，初步插值计算出若干组侧压力系数。然后采用三维正交多项式拟合得到远古时期的初始地应力场。根据式 (10)，(11) 可计算得到等效构造作用荷载 P_s ，将地应力场加载至模型并完成初始地应力场平衡，如图 3 (a) 所示。其次对远古时期应力场分 5 期进行逐层开挖计算模拟河谷的下切剥蚀过程 (图 3 (b) → 图 3 (c))。最后得到现今河谷地貌的应力场，见图 3 (d)。

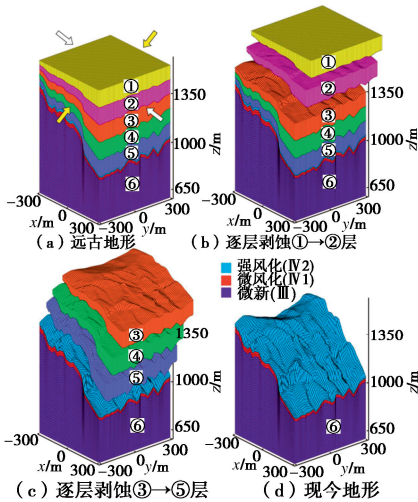


图 3 地表剥蚀过程的有限元模型网格图

Fig. 3 FEM meshes for ground surface abrasion process

表 3 测点位置地应力实测值与反演值对比

Table 3 Comparison between measured geostress values and inverse values at measuring points

测点编号	取值类型	应力分量值/MPa				埋深/m	相对误差/%
		σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}		
1	实测	-4.86	-6.35	-9.69	1.11	376.3	—
	一次反演	-5.08	-6.66	-10.12	1.17		4.57
	二次反演	-5.19	-6.41	-10.17	1.15		4.21
	反演	-5.19	-6.41	-10.17	1.15		4.21
2	实测	-5.16	-6.63	-9.94	1.09	385.8	—
	一次反演	-5.25	-6.85	-10.29	1.19		3.23
	二次反演	-5.33	-6.62	-10.26	1.17		2.40
	反演	-5.33	-6.62	-10.26	1.17		2.40
3	实测	-5.79	-7.32	-10.17	1.13	394.7	—
	一次反演	-5.97	-7.41	-10.72	1.26		3.90
	二次反演	-6.17	-7.71	-10.36	1.17		3.68
	反演	-6.17	-7.71	-10.36	1.17		3.68
4	实测	-6.12	-7.71	-10.29	1.17	399.1	—
	一次反演	-6.90	-8.56	-11.02	1.33		9.35
	二次反演	-6.64	-8.29	-10.59	1.05		5.23
	反演	-6.64	-8.29	-10.59	1.05		5.23
5	实测	-6.54	-8.23	-10.95	1.25	424.8	—
	一次反演	-7.88	-9.71	-11.69	1.29		12.72
	二次反演	-7.76	-9.18	-11.25	1.34		8.45
	反演	-7.76	-9.18	-11.25	1.34		8.45
6	实测	-6.80	-8.59	-11.07	1.33	429.1	—
	一次反演	-8.12	-10.76	-11.91	1.36		15.41
	二次反演	-7.88	-9.42	-11.44	1.30		7.69
	反演	-7.88	-9.42	-11.44	1.30		7.69

一次反演和二次反演计算得到的测点应力分量与实测值之间的对比关系见表 3，相对误差定义为

$$\Delta = \left| \frac{\| \text{实测值} \|_2 - \| \text{计算值} \|_2}{\| \text{实测值} \|_2} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中： $\| \bullet \|_2$ 为 2-范数，表示向量元素绝对值的平方和再开平方根。

由表 3 对比结果可知，一次反演分析中#1、#2 和 #3 测点应力分量的反演计算值与实测值较为接近，相对误差均控制在 5%以内，表明坝址区大范围一次反

演应力场基本反应了实测点的规律, 结果合理。但#4、#5和#6测点的应力反演值与实测值相差较大, 相对误差在15%左右, 主要是因为, 根据厂区的地质构造来看, #1、#2和#3测点均位于层状岩体的硬岩岩体中, 岩体相对完整, 而#4、#5和#6测点位于层状岩体中硬岩与软岩的交界面附近, 受层间剪切挤压破碎带的影响, 其应力量值和方向均受到影响。而一次反演模型由于未考虑层状岩体地质条件的影响, 所反演计算的初始地应力场在软弱地质构造附近与实测值相差较大, 需进行二次反演。

由水压致裂法钻孔数据的空间分布性, 可拟合得到三维地应力侧压力系数函数, 据此反演得到工程区随埋深变化的初始地应力场。厂址区一次反演应力分布等值线图如图4所示, 一次反演回归应力场整体呈层状分布, 基本上反映了地形地貌对初始应力场的影响。对于浅层岩体, 主应力等值线受地形变化影响较大, 尤其是在靠近河谷深切处, 受地层剥蚀作用影响较大, 主应力等值线分布较密且应力变化梯度也较大。此外在地形坡度较大的地方, 应力等值线梯度变化也较大。总体上看, 浅层岩体主应力量值相对较小, 最大主应力 σ_1 基本控制在8 MPa以内, 主要由于浅层岩体大多为强弱风化岩体, 在河谷地貌形成过程中, 经过漫长的岸坡卸荷过程, 应力进一步释放并向深部转移, 从而形成现今河谷岸坡较低的应力赋存环境。对于深部岩体, 应力场基本不受地层剥蚀作用的影响, 主应力等值线分布均匀, 随地形起伏变化较小, 主应力量值随埋深从上到下逐渐增大, 基本保持了原岩应力状态。综上分析可知, 大模型一次反演计算基本能够符合场吻合的要求, 即反映地形地貌等因素对初始地应力场分布规律的影响, 并进而地质条件较好、岩体较为完整处满足点吻合的要求。

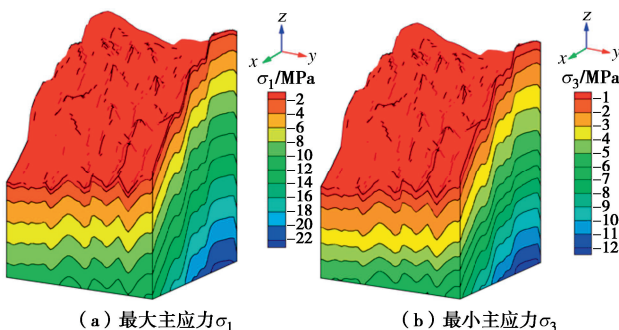


图4 一次反演厂址区主应力分布等值线图

Fig. 4 Contour diagrams of principal stresses at dam site for first-stage inverse analysis

3.3 层状岩体地应力场二次反演分析

为反映工程区层状岩体对初始地应力场扰动的影

响, 如图5所示, 建立局部精细化二次反演模型(以下称为“小模型”)。小模型主要包括IV类薄层钙质泥岩和III类厚层灰岩, 具有明显的层状构造特征。小模型均采用八节点六面体单元离散, 共剖分了369600个等参单元和385398个节点。小模型坐标系和原点与一次反演模型一致, 但计算范围大幅减小, x , y 轴的计算范围为350 m×240 m, z 轴范围为700~1409 m。

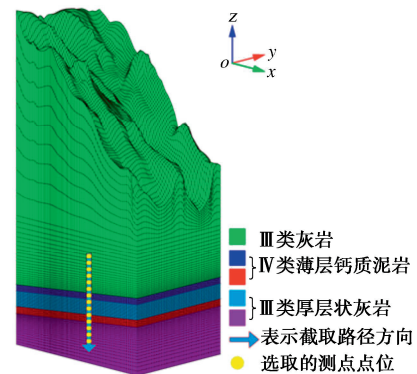


图5 二次反演含层状岩体模型网格图

Fig. 5 Meshes of layered rock mass for second-stage inverse analysis

根据一次反演应力场结果, 将小模型的所有单元放入大模型中, 采用八节点六面体单元形函数插值得小模型应力场。考虑边界条件后, 根据式(10), (11)计算小模型每个节点的等效构造作用荷载 P_s^{small} 。对小模型施加自重荷载和等效构造作用荷载, 并进行三维弹塑性有限元计算, 最终得到层状岩体及层间剪切带影响下的小模型初始地应力场。

由表3可知, 在考虑层状岩体地质构造的二次反演后, 实测点应力分量的反演值相比一次反演结果均有所变化。其中, #1、#2和#3测点由于位于岩体完整的III类厚层灰岩中, 在一次反演时拟合精度已较高, 使得二次反演时在弹塑性迭代后其应力量值调整幅度较小, 相对误差分别减小到4.21%, 2.40%, 3.68%, 反演精度较高。而#4、#5和#6测点在考虑层状岩体进行二次反演后, 其应力分量值调整幅度较大, 3个测点应力分量的相对误差分别从9.35%, 12.72%, 15.41%减小到5.23%, 8.45%, 7.69%, 应力分量值更接近实测值, 二次反演进一步提高了一次反演所得地应力场的精度。

由于6个测点均位于同一钻孔中, 故二次反演钻孔段截面($y=0$ m)最大、最小主应力等值线分布如图6所示。反演结果表明, 工程区岩体呈IV类薄层泥岩和III类厚层灰岩软硬互层状分布, 其中, 由于IV类泥岩层地质构造软弱且力学参数较低, 故泥岩层内部最大、最小主应力量值显著降低, 产生了明显的应力

释放现象。而在层间剪切、挤压破碎带附近,由于受挤压作用的影响,泥岩层边缘应力量值有所增大,在岩体较为完整的灰岩层内部,主应力量值也有所升高。所以,在软硬互层状岩体附近应力梯度变化较为明显,主应力等值线出现突变现象,呈凹状分布,形成了独特的层状岩体应力影响区。由图 6 可知,钻孔段截面 IV 类泥岩层内部岩体最大主应力 σ_1 降低了 0.5~1.0 MPa,最小主应力 σ_3 降低了 0~0.5 MPa。在层间挤压破碎带附近,由于层面的强度参数远低于岩体的强度参数,当采用弹塑性理论进行二次反演时,该区域岩体易发生层间破坏,主要包括沿层面的剪切滑移和垂直层面的张拉破坏^[1],出现了少量的塑性屈服区。考虑层状各向异性的小模型由于层面的存在,使得破坏区分布会受到影响并产生偏转,呈现从层面向垂直于层面方向扩展分布的趋势,如图 7 所示。落在塑性区的单元应力量值经迭代计算后会发生调整,故层面附近岩体最大、最小主应力增加了约 0.4 MPa。因此,二次反演是在一次反演的基础之上对局部复杂地质构造进行精细化模拟,能够较好地反映工程区层状岩体对初始地应力场的扰动影响。

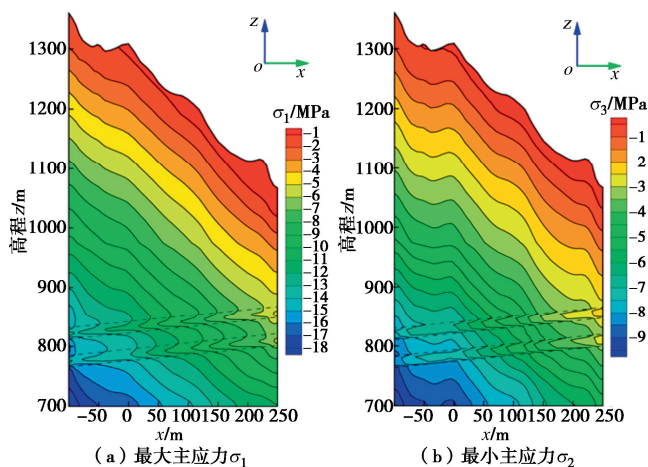


图 6 二次反演钻孔段截面主应力分布等值线图

Fig. 6 Principal stress contour diagrams of drilling section for second-stage inverse analysis

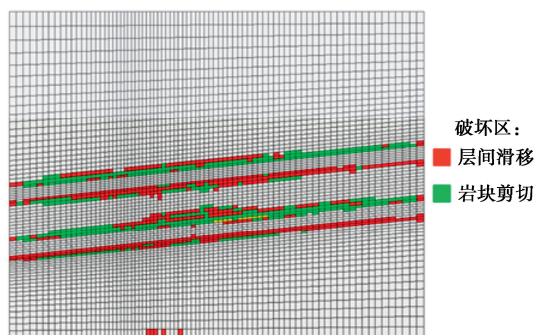


图 7 小模型破坏区分布

Fig. 7 Distribution of failure zones of small model

层状岩体还会对其影响区内地应力场方向产生显著的扰动作用。由于地应力场的最大主应力对地下洞室的围岩稳定具有控制作用,本文主要分析层状岩体影响下厂房区最大主应力方向的变化规律。取钻孔段截面 ($y=0$ m),并沿截面 x 正方向选取多条穿过互层状岩体的路径,如图 5 所示。定义最大主应力 σ_1 方向与 z 轴正方向的夹角为偏转角,针对每条路径分别从上至下提取若干测点的最大主应力偏转角数据,绘制多条路径上这些测点沿路径方向的最大主应力方向变化分布图(图 8)。在图 8 中,沿路径方向可以看出,在层状岩体中地质条件较差的泥岩层附近最大主应力偏转角出现极值,表明初始地应力场最大主应力方向受层状构造岩体扰动影响显著。

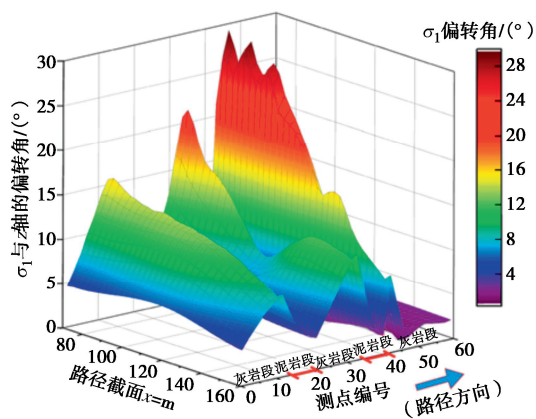


图 8 层状岩体影响区测点最大主应力偏转角分布

Fig. 8 Distribution of deflection angle of maximum principal stress in influence zone of layered rock mass

具体来看,在层间剪切带附近,泥岩层外侧岩体最大主应力 σ_1 的偏转角较大,表明最大主应力 σ_1 方向朝平行于层间界面的方向发生偏转。由于岩体呈缓倾角灰岩、泥岩互层状展布,泥岩层内侧岩体最大主应力 σ_1 的偏转角较小,即应力倾角变陡,表明最大主应力 σ_1 方向趋向于垂直于层间界面,明显不同于附近灰岩层内最大主应力 σ_1 方向。层间界面附近最大主应力 σ_1 的偏转幅度最大可达约 30° 。最小主应力 σ_3 由于和最大主应力 σ_1 相互垂直,相对层间界面的偏转扰动规律相反。二次反演结果表明了层状构造岩体对贵阳抽水蓄能电站地下厂房区的初始地应力场方向有显著的偏转扰动影响。

4 结 论

针对复杂河谷演化作用和层状岩体对局部地应力场的影响,在地层剥蚀模拟和侧压力系数反演方法基础之上,建立基于等效构造作用的层状岩体三维初始

地应力场二次反演方法。结合贵阳抽水蓄能水电站地下厂房, 研究层状岩体及其层间剪切带对局部地应力场量值、方向和扰动范围的影响规律。主要得到以下3点结论。

(1) 首先, 采用考虑地层剥蚀作用的侧压力系数法拟合得到河谷演化完成后厂区一次反演模型地应力场。在此基础上建立层状岩体二次反演模型, 并从一次反演应力场中插值获取等效节点力荷载来模拟构造作用, 建立了基于等效构造作用荷载的层状岩体地应力场二次反演方法。该反演分析方法能够综合考虑复杂河谷演化作用、地形地貌特征、构造作用以及层状岩体等的影响, 能够满足地应力场点吻合和场吻合的要求, 较好地反映了层状岩体及其层间剪切带附近局部地应力场的不均匀特征。

(2) 将该反演分析方法运用于贵阳抽水蓄能水电站地下厂房中, 二次反演计算得到的地应力场结果能够满足实测点处点吻合和反映河谷演化和层状岩体影响的场吻合要求。通过具体工程实例分析验证了#4、#5和#6测点应力分量值变化较大主要受到层状构造特征的影响。工程区地应力场受层面的扰动影响, 在层状岩体层间剪切带附近即软弱岩层外侧的主应力量值稍有增大, 在层状岩体软岩层内主应力量值降低。由于层面的存在, 使得岩体破坏区分布受到影响并产生偏转, 呈现从层面向垂直于层面方向扩展分布的趋势。

(3) 二次反演结果表明了层状构造岩体对初始地应力场方向有显著的偏转扰动影响。在层状岩体层间剪切带附近即软弱岩层外侧, 最大主应力方向朝平行于层面偏转; 在层状岩体软岩层内, 最大主应力向朝垂直于层面偏转。层状岩体对其附近地应力场量值、方向和扰动范围的影响大小, 跟岩层走向与区域主应力夹角, 层状岩体的不同力学性质及其规模而呈现规律性变化。反演结果符合层状岩体及其层间剪切带对局部应力场量值和方向的基本影响规律, 为研究层状岩体地下洞室围岩稳定性提供了初始应力场条件。

参考文献:

- [1] 梅松华. 层状岩体开挖变形机制及破坏机理研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008. (MEI Songhua. Study on Deformation Mechanism and Failure Mechanism of Layered Rock Mass Excavation[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))
- [2] 刘中春, 吕心瑞, 李玉坤, 等. 断层对地应力场方向的影响机理[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 387-393. (LIU Zhongchun, LÜ Xinrui, LI Yukun, et al. Mechanism of faults acting on in situ stress field direction[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 387-393. (in Chinese))
- [3] 孙礼健, 朱元清, 杨光亮, 等. 断层端部及附近地应力场的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(2): 7-12. (SUN Lijian, ZHU Yuanqing, YANG Guangliang, et al. Numerical simulation of ground stress field at ends and vicinity of a fault[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(2): 7-12. (in Chinese))
- [4] LI K, WANG Y Y, HUANG X C. DDM regression analysis of the in situ stress field in a non-linear fault zone[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(7): 567-573.
- [5] 张勇慧, 魏 倩, 盛 谦, 等. 大岗山水电站地下厂房区三维地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1523-1530. (ZHANG Yonghui, WEI Qian, SHENG Qian, 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. (in Chinese))
- [6] 余大军, 杨张杰, 郭运华, 等. 基于FLAC^{3D}横观各向同性模型的煤矿井田初始地应力场反演方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3427-3434. (YU Dajun, YANG Zhangjie, GUO Yunhua, et al. Inversion method of initial geostress in coal mine field based on FLAC^{3D} transverse isotropic model[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3427-3434. (in Chinese))
- [7] 赵 辰, 肖 明, 陈俊涛. 复杂地质条件下初始地应力场反演分析方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 87-92. (ZHAO Chen, XIAO Ming, CHEN Juntao. Inversion analysis method for in situ stress field under complex geological conditions[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(8): 87-92. (in Chinese))
- [8] 张志增. 横观各向同性岩体位移反分析的理论与应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (ZHANG Zhizeng. Study on Theory and Application of Displacement Back Analysis of Transversely Isotropic Rock Mass[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [9] 颜天佑, 崔 臻, 张勇慧, 等. 跨活动断裂隧洞工程赋存区域地应力场分布特征研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 378-386. (YAN Tian-you, CUI Zhen, ZHANG Yong-hui,

- et al. Study of distribution characteristics of in-situ stress field in occurrence area of crossing active fault tunnel engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S1): 378-386. (in Chinese))
- [10] 陈世杰, 肖明, 陈俊涛, 等. 断层对地应力场方向的扰动规律及反演分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(7): 1434-1444. (CHEN Shijie, XIAO Ming, CHEN Juntao, et al. Disturbance law of faults to in situ stress field directions and its inversion analysis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(7): 1434-1444. (in Chinese))
- [11] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 复杂地质条件下坝区初始地应力场二次反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 2779-2785. (PEI Qitao, LI Haibo, LIU Yaqun, et al. Two-stage back analysis of initial geostress field of dam areas under complex geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 2779-2785. (in Chinese))
- [12] 江权, 冯夏庭, 陈建林, 等. 锦屏二级水电站厂址区域三维地应力场非线性反演[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3003-3010. (JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Jianlin, et al. Nonlinear inversion of 3D initial geostress field in Jinping II Hydropower Station Region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3003-3010. (in Chinese))
- [13] 徐磊. 一种实现复杂初始地应力场精确平衡的通用方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, **34**(3): 30-33. (XU Lei. A general method for the accurate equilibrium of complex initial in-situ stress field[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2012, **34**(3): 30-33. (in Chinese))
- [14] 郭运华, 朱维申, 李新平, 等. 基于FLAC^{3D}改进的初始地应力场回归方法[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 892-898. (GUO Yunhua, ZHU Weishen, LI Xinping, et al. Improved regression method for initial geostress based on FLAC^{3D}[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 892-898. (in Chinese))
- [15] 秦卫星, 付成华, 汪卫明, 等. 基于子模型法的初始地应力场精细模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 930-934. (QIN Weixing, FU Chenghua, WANG Weiming, et al. Refined simulation of initial geostress field based on sub-model method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 930-934. (in Chinese))