

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0050-05

白鹤滩水电站坝区岩体三维地应力场模拟

孟国涛¹, 徐卫亚¹, 石安池²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 岩体地应力是岩体工程最基本也是最重要的工程荷载之一, 是设计和分析的基础。应用三维离散单元法 (3DEC) 对金沙江白鹤滩水电站坝区岩体初始地应力场进行了模拟, 模拟所得地应力场符合河谷地应力场分布的一般规律, 对比水压致裂法 6 个测点的测值, 模拟结果达到了一定的精度, 能够满足目前阶段的工程需要。

关 键 词: 岩石力学; 三维离散单元法 (3DEC); 河谷; 地应力; 白鹤滩水电站

中图分类号: O 242

文献标识码: A

Three-dimensional stress field simulation around dam area of Baihetan Hydropower Station

MENG Guo-tao¹, XUN Wei-ya¹, SHI An-chi²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. East China Hydropower Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Initial stress is one of the key factors for rock engineering, and is one of the elementary indexes required in design, especially for large hydroelectric engineering. The study on in-situ stress field of rock mass around the dam area of Baihetan Hydropower Station had been carried out. Based on the means of numerical simulation with three-dimensional distinct element code (3DEC), the rock mass natural stress of a valley has been simulated. The result shows that the stress distribution has three areas: the area of loosed stress, the area of concentrated stress and the area of stable stress, which is according with typical stress distribution pattern in a deep valley. What is more, the calculations fit well with in-situ measuring data by using hydraulic fracturing method including 6 points. The simulation results delineate clearly the whole outline of the stress field of dam site, and provide important basis for analysis and design.

Key words: rock mechanics; three-dimensional distinct element code (3DEC); numerical simulation; stress field; river valley; Baihetan hydropower station

1 引 言

岩体地应力是岩体工程最基本也是最重要的工程荷载之一。岩体力学参数的选择、岩体破坏准则的应用、岩体稳定性评价都取决于符合实际的初应力状态, 因此, 初始应力分布应该作为设计和分析的基础。

大型水电工程所在的河谷地区, 地应力分布除了具有一般特征外, 还具有其特殊性, 即河谷侵蚀下切中的差异性使得地应力分布更加复杂, 多呈现一种局部地应力场特征^[1,2] (图 1)。因此, 不能视初始应力为自重应力与构造应力的简单叠加。实际中, 少量的现场测量结果往往比较离散, 缺乏统计

意义, 加之河谷应力场的非均匀性、山体的构造不连续和岩层的非均质性, 由少量测试结果反演全场应力状态, 条件并不充分。

针对地应力场的复杂性, 数值模拟方法得到不断的发展, 自 20 世纪 80 年代起, 地应力试算法^[3]、地应力趋势分析法、地应力回归分析法^[4]、有限元图谱法、正交试验理论与有限元结合^[5,6]等方法相继被提出。其中, 正交试验理论可以大幅减少试算次数, 同时能保证解的最优性, 其与有限元的结合在工程实践中都取得了一定的成果。

鉴于三维离散单元程序 3DEC 较有限元程序更擅于模拟复杂的构造情况, 同时便于实现开挖过程, 本文基于正交理论, 应用 3DEC 对金沙江上游白鹤滩

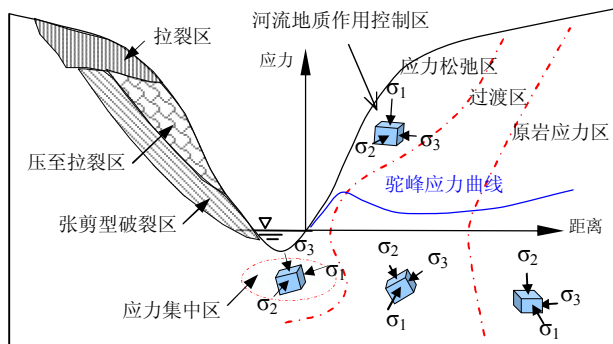


图1 河谷应力场分布

Fig. 1 A typical stress distribution pattern for a deep valley

水电站坝区初始地应力场进行了模拟。具体过程为：首先根据野外地质调查结果，建立研究区的地质力学模型(模型中不仅考虑了复杂的地质构造，而且反应了微地貌特征)，进而以河谷地应力场的成因为基础，考虑新构造运动等因素，应用正交理论与3DEC结合的方法对河谷区三维地应力场进行数值模拟，获得河谷地应力场，并与实测点地应力结果进行比较。成果已经成功地应用于工程实践中。

2 正交理论与3DEC结合方法

将河谷地应力场看成是在一般地应力场(主要由重力和构造应力组成)的基础上，由于河谷改造后形成的一个局部应力场。

首先确定研究范围，建立3DEC初始模型。由于河谷形成前的地表相对平坦，假定地应力场满足：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= K_1 H + T_1 \\ \sigma_2 &= \gamma H \\ \sigma_3 &= K_2 H + T_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力。

然后，用分步“开挖”方式模拟河流侵蚀下切，从而得出一个给定条件下的河谷地应力场。

初始模型(图2a)顶边界为虚拟的原地面，即等效的剥蚀起始面，在实际地质历史演变过程中，河谷区这一剥蚀地面肯定高于两岸山峰的高度，设河谷形成前的地表形态可以近似地用平面方程表示：

$$u = ax + b \quad (2)$$

式中： a 、 b 为常数， u 为垂直坐标， x 为垂直河流方向的水平坐标。

由于一旦给定 K_1 、 K_2 、 T_1 、 T_2 、 a 和 b ，就得出了一个相应的地应力场。当所得到的地应力场

满足以下2个条件时，即认为计算得出的地应力满足要求。

(1)地应力分布规律符合河谷地应力场的基本特征，即图1所示规律；

(2)在地应力测点处，实测值与计算值之间满足一定精度。

在实际求解中，由于 K_1 、 K_2 、 T_1 、 T_2 、 a 和 b 无法事先确定，需要进行大量的试算。引入正交理论后，能大幅减小试算工作量，同时保证解的最优性。

由于受第三纪、第四纪地表侵蚀作用的影响， K 值变化不大，而 T 值会明显增大。在数百米深度范围，由 K 值的取值误差到来的计算误差不大，而且在参数回归中 K 值较为稳定，精度亦较好，因此，计算中可以按表1取 K 为定值。对于余下的4个参数，假设它们与应力之间的关系满足：

$$\{\sigma\} = \beta_0 + \sum_{j=1}^4 \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^4 \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon \quad (3)$$

式中： β_0 、 β_j 、 β_{ij} 、 β_{jj} 为待定回归系数； x_j ($j=1, 2, 3, 4$)表示上述4个待定参数。

表1 不同岩石中地应力参数回归统计值^[6]
Table 1 Regression statistical data of natural stress parameters in different rock types

岩类	最大水平主应力			铅直应力			最小水平主应力		
	K	T	N	K	T	N	K	T	N
岩浆岩	0.031	13.65	98	0.024	-	53	0.016	7.27	86
沉积岩	0.022	7.89	112	0.018	-	62	0.016	4.02	79
变质岩	0.021	12.00	83	0.025	-	70	0.018	6.29	62

注： K 为应力随深度分布的斜率(MPa/m)； T 为截距(MPa)； N 为统计样本数目。

进而，按照4因子二次正交试验要求和相应的统计分析方法求出满足条件的4个参数的取值。

最后，用4个参数的取值进行计算，获得最终的地应力场。

3 研究区概况

拟建金沙江白鹤滩水电站位于金沙江下游攀枝花至宜宾河段。坝址河道顺直，河谷相对较窄，河床覆盖层较薄，两岸山体雄厚，基岩以块状玄武岩为主，上覆地层为粉砂岩，地质构造相对简单。

大坝河段为一套二迭系上统峨眉山玄武岩地层，地层产状总体平缓，右岸为反向坡，岸坡高陡，左岸相对平缓。坝址区未见较大规模断层，发育于

玄武岩中的层间错动带具有一定厚度,为凝灰岩组成。贯通性好,延伸贯穿整个坝区,构成坝区构造及岩体结构的基本构架。

喜马拉雅运动对坝址外围地区构造具有显著的构造改动作用,外围众多断层(带)呈走滑和挤压特征均与喜马拉雅运动有密切的关系。NWW 向构造应力场对该区的影响一直延续至今,构造应力场总体背景水平在 6~10 MPa 之间。水电站坝址区位于断裂所围限的楔形区内,不具备局部高构造应力力集中的特殊机制。

高边坡形成过程中的局部应力集中现象和岩体强度之间的矛盾表现得比较突出,局部呈现高地应力特征。表现为 PD61、PD62 局部岩爆、片帮,及河床部位 ZK40、ZK47、ZK72 和 ZK80 的饼状岩芯现象。

4 数值模拟与方法

4.1 计算模型

河流下游方向为近北向,3DEC 计算模型^[7,8]在 N、E、U 方向的尺寸为:2 km×1.8 km×1.1 km,见图 2。建立模型时,有如下考虑:

(1) 岩流层。由于模型选取的范围大,而且不同类型玄武岩的参数差别不大,为了便于模型的建立与计算,模型中没有具体区别不同类型的玄武岩,同一岩流层视为一种材料。

(2) 结构面。坝区控制性的结构面为发育在玄武岩岩流层间的层间错动带。11 个层间错动带贯穿整个模型区,均考虑在模型中。

(3) 地形。考虑到模型在地形上的仿真影响着侵蚀下切量,进而影响着数值模拟的精度,所以,微地形特征在模型中得到了体现。

(4) 河谷下切过程。坝区由一系列北西向陡崖、缓坡平台构成,呈台阶状,左岸台阶较宽缓,主要有三级阶面,右岸较狭窄,主要有五级。台阶斜率变化反应了侵蚀速率的改变,因此将河谷侵蚀下切考虑为分 5 步完成。

4.2 本构与参数

本次计算岩体采用 Mohr-Coulomb 准则弹塑性本构方程,见式(4)和(5)。计算参数见表 2。

$$\left. \begin{aligned} f^s &= \sigma_1 - N_\phi \sigma_3 + 2c\sqrt{N_\phi} \\ f_t &= \sigma_3 - \sigma^t = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

层间错动带及控制性断层采用 Coulomb-slip 模型表达式见式(6)。计算参数见表 3。

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (6)$$

式中: τ 为结构面峰值剪切强度; σ_n 为法向应力; φ 为结构面的摩擦角; c 为结构面的凝聚力。

4.3 模拟过程

以初始模型为基础,按 5 个开挖步模拟(图 2b~图 2f)河谷的分期侵蚀下切。由于原始河床规模及发育无法推论,出于大型三维数值模拟简化的方便,原始河床并未反应于模型中。但三维模型强调了地形、构造的仿真,期以较为准确地把握卸荷量,从而构建更为精细的局部地应力场。

模型的底边界为三向约束,四周边界为水平约束。构造应力根据区域地应力的量级,最大主应力方向为 NWW 向。实际模拟中取最大主应力为 K_1 取值 0.031,方向为 N70° W, K_2 取值为 0.016 方向为 N20° E。给定材料参数后,按自重及边界荷载计算初始应力场。

按 T_1 , T_2 , a 和 b 的不同取值组合,分别进行 3DEC 计算,得出待参数的不同取值条件下的河谷地应力分布及每一测点处的计算地应力值。对每一测点处而言,应用计算地应力值,建立如式(3)所示的回归方程,求出所有测点的每一应力分量的回归方程的回归系数。所得到的回归方程在 0.05 的水平下经 F 检验均高度显著,对应的参数取值可以用以获得最终的地应力场。

表 2 岩体物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of rock mass

岩体类型	变形模量 /GPa	泊松比	容重 /kN·m ⁻³	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
玄武岩	25	0.20	27.5	2.1	45	2
粉砂岩	16.5	0.23	25	1.3	42	1.6
凝灰岩	1.15	0.3	22	0.5	35	0.05

表 3 结构面力学参数
Table 3 Joint properties used in the 3DEC model

类型	K_n /GPa·m ⁻¹	K_s /GPa·m ⁻¹	c /MPa	ϕ /(°)
层间带	3.0	2.0	0.3	40
F ₁₆	2.0	1.5	0.2	33
F ₄	1.5	1.0	0.2	30

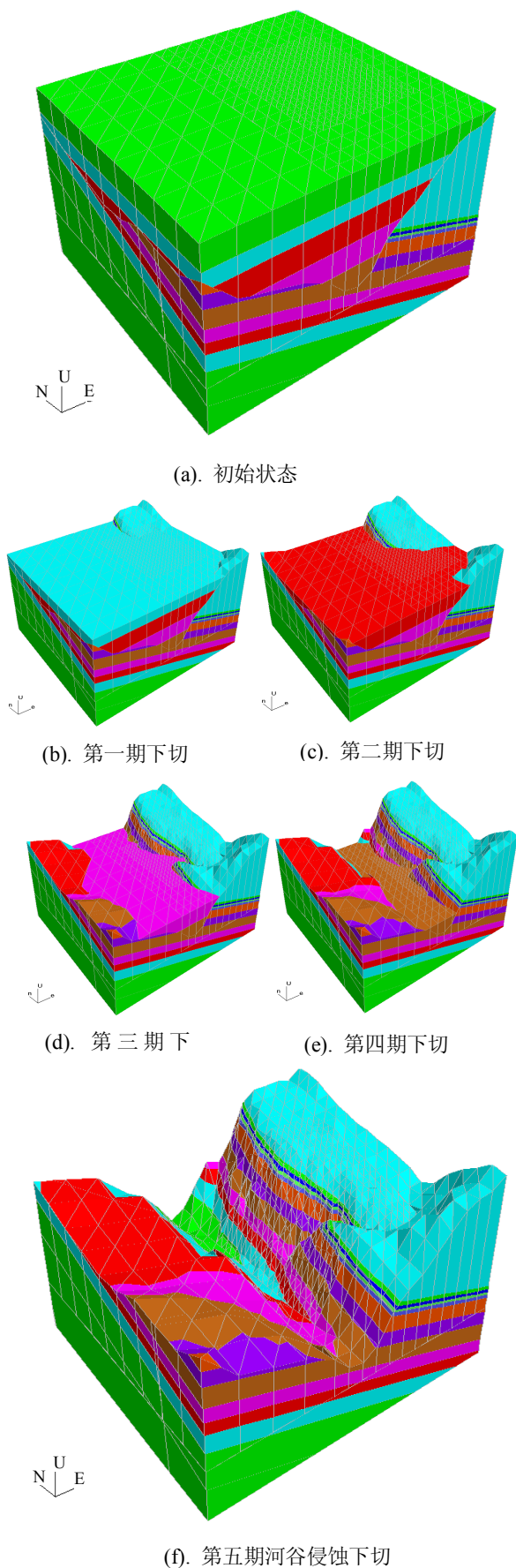


图2 3DEC河谷侵蚀下切模型
Fig.2 3DEC model

5 模拟结果

5.1 计算结果分析

外边坡应力呈现的“驼峰型”分布。对比图 1 与图 3，河谷下切中，随着边坡侧向应力的解除，边坡产生回弹变形，应力产生相应的调整，其结果是在边坡一定深度范围内形成二次应力场分布。

在右岸出现了明显的应力松弛区^[9]。谷坡中上部由卸荷引起的应力松弛区（拉裂区）非常明显，显著的低应力位置与地质上划分出的强、弱卸荷带的范围基本相当。

河谷底部出现明显的“高应力包”现象。这个部位的应力集中现象可以由勘测过程中的钻孔岩芯饼化现象所印证，根据钻孔岩芯的统计结果，饼状岩芯密集带几乎全部位于 400~460 m 高程之间，该区域正是河床部位的应力强烈集中区。因此，计算获的河床应力集中区与岩芯饼化区在空间位置上具有非常好的一致性。

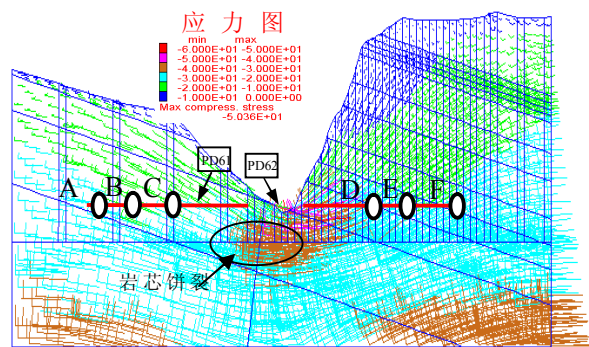


图3 典型剖面主应力矢量图
Fig.3 Principal stress vector
diagram of representative cut plane

5.2 结果与实测结果

沿坝轴线在平硐 PD61、PD62 中采用水压致裂法，分别进行 3 组地应力测试，图 3 中标出了 PD61、PD62 地应力测试点在该剖面上的位置，并将 DK1、DK2、DK3、DK6、DK5 和 DK4 几个测点分别标记为 A、B、C、D、E 和 F。实测结果与模拟结果列于表 4 中，由表可见计算结果得到的各测点的应力量级与测试结果基本相符，除个别测点外，误差多在 20% 以内。

综合考虑模拟地应力场分布特征（图 1 与图 3）及与实测值的比较（表 4），模拟所得地应力场满足第 2 节所述的 2 个条件，可以判定初始地应力场模拟是基本可靠的。

6 结 语

初始应力分布应该作为设计和分析的基础，相

表 4 地应力模拟值与实测值比较表
Table 4 Comparison between the simulated and the measured values of σ_1 and σ_3

测点	位置	σ_1 /MPa			σ_3 /MPa		
		模拟值	实测值	误差/%	模拟值	实测值	误差/%
DK1	A	19.55	16.5	18.5	5.97	5.9	1.18
DK2	B	15.16	10.7	41.7	5.55	5.1	8.8
DK3	C	15.22	13.4	13.6	4.44	5.6	-20.7
DK6	D	21.16	20.4	3.7	9.44	9.7	-2.7
DK5	E	19.63	22.9	-14.3	9.45	9.9	-4.5
DK4	F	20.84	21.1	-1.2	6.59	5.2	26.7

注：表中误差指相对误差，误差=[(模拟值-实测值)/实测值]×100%。

应地，也应该是岩体工程问题数值计算的初始条件之一。针对工程岩体所处的初应力环境，选择合理的岩体力学参数及破坏准则，以初始应力状态为初始条件，方能实现岩体工程的合理分析、评价。

基于 3DEC 探讨河谷地应力分布的基本规律，对各类构造形迹的形成机制进行解释、对隐伏结构面及施工中可能出现的相关问题进行评估^[10]，从而判断工程岩体对工程作用的响应，有比较突出的意义。

参 考 文 献

- [1] Brown, E.T., Hoek, E., 1978. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. Geomech. Abstr. 15, 211—215.
- [2] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292—297.
HUANG Runqiu. Main characteristics of high rock slopes in Southwestern China and their dynamic evolution[J]. **Advances in Earth Science**, 2005, 20(3): 292—297.
- [3] 柴贺军, 刘浩吾, 王明华. 大型电站坝区应力场三维弹塑性有限元模拟与拟合[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 314—1 318.
CHAI Hejun, LIU Haowu, WANG Minghua. Stress field

simulation and fitting by 3-D elastoplastic FEM [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(9): 1 314—1 318.

- [4] S.D. McKinnon. Analysis of stress measurements using a numerical model methodology. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 38 (2001) 699—709.
- [5] 朱焕春, 赵海斌. 河谷地应力场的数值模拟[J]. 水利学报, 1996, (5): 29—36.
ZHU Huanchun, ZHAO Haibin. Numerical simulation of rock stress field in a valley[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (5): 29—36.
- [6] 王涛, 周先前, 田树斌, 等. 基于正交设计的河谷地应力场数值模拟方法及应用[J]. 岩土力学, 2003, 24 (5): 831—835.
WANG Tao, ZHOU Xianqian, TIAN Shubin, et al. Numerical simulation method for rock natural stress field of a valley and its application based on orthogonal experiments[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 831—835.
- [7] Itasca, Three dimensional distinct element code: user's guide[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc; 1999.
- [8] Cundall, P.A. Formulation of a three dimensional distinct element model: Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomech. Abstr.** 1988, 25, 107—116.
- [9] Savage WZ. Gravity induced stresses near a vertical cliff[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomech Abstr** 1993;30:325—30.
- [10] 徐则民, 黄润秋, 陈颖辉, 等. 河谷应力集中及岩体响应[J]. 工程勘察, 2003, (1): 4—7.