

清江水布垭工程坝区三维应力场研究

胡道功 石 玲 谭成轩 徐瑞春 梅应堂

摘 要：水布垭水电枢纽拟建于清江干流深切峡谷地段，重力是决定坝址区岩体稳定与否的关键因素。该文采用三维有限元数值模拟的方法，对坝区岩体在重力作用下的应力场和位移场进行研究，为工程建设和坝区岩质边坡稳定性评价提供了重要依据。

关键词：应力场；位移场；三维数值模拟；水布垭

分类号：TU441.35

文献标识码：A

STUDY ON 3-D STRESS FIELD OF SHUIBUYA DAM SITE ON QINGJIANG RIVER

HU Daogong¹, SHI Ling¹, TAN Chenxuan¹, XU Ruichun², MEI Yingtang²

¹ *Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081;*

² *Survey Institute of Three Gorges, the Yangtze River Conservancy Commission, Yichang
HuBei 443003.*

Abstract: The Shuibuya hydroelectric project will be built in gorge morphology on Qingjiang River, the gravitation is key factor which decides whether the rock in dam site is stable or not. In this paper, we study stress and strain field of rock body in dam site under the gravitative using 3-D finite-element simulation method, the result provides an important evidence for project construction and assessing the stability of rock slope.

Key words: stress field; strain field; 3-D numerical simulation; Shuibuya dam site

0 概况

水布垭水利枢纽是清江干流大型梯级水电工程之一，拟建坝高230—250m，库容 47×10^8 — $60 \times 10^6 \text{m}^3$ ，装机容量 150×10^5 — $200 \times 10^5 \text{kW}$ 。坝址位于水布垭下游NNE向峡谷河段的中部(图1)。坝址区出露地层有二叠系龙潭组、茅口组、栖霞组灰岩，以及石炭系—志留系灰岩、砂岩和志留系页岩。其中位于坝轴线附近的栖霞组发育多层剪切滑动形成的软弱夹层^[1]，两岸峡谷边坡高峻陡立，地下厂房和泄水建筑物将修建于峡谷出口两侧的大崖、马崖边坡之下。因此，重力作用下的高陡边坡稳定性问题是其主要工程地质问题之一。本文采用三维有限元数值模拟的方法，以重力作为力源，对坝址区岩体三维应力场和位移场进行模拟计算，为高陡边坡的变形及其稳定性评价提供依据。

1 三维有限元模型

有限元模型平面范围同图1。由东西长2000m，南北宽1800m，厚约350—700m的三维地质体剖分而成，坝址位于模型中心(图2)。模型底面高程为-100m，顶面按地形面建模。横向上，由12个EW向剖面控制地层、断层和地形；纵向上，将地层概化为三个工程地质岩石组合：下部为志留、泥盆、石炭系的砂岩、页岩及灰岩；中部为二叠系栖霞组底部砂、页岩及煤层；上部为二叠系栖霞组和茅口组灰岩。模型中断裂包括库区和坝区 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_7 、 F_8 、 F_{12} 、 F_{39} 等8条断层，产状按实际走向和倾角考虑，并给一定的宽度。受模型比例的限制，剪切带仅考虑栖霞组煤系地层。

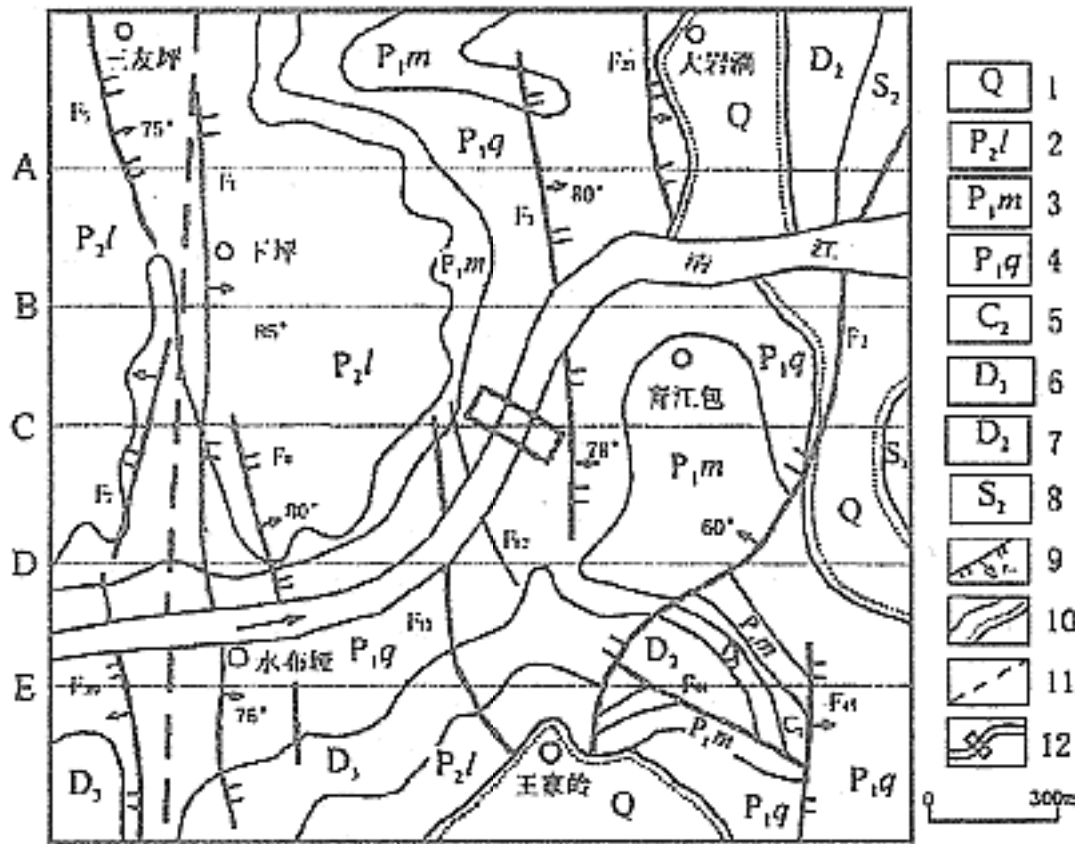


图1 水布垭坝址工程地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Shuibuya dam site

1.第四系；2—4.分别为二叠系龙潭组、茅口组、栖霞组；5.中石炭统；6.上泥盆统；7.中泥盆统；8.中志留统；9.断层；10.地质界线；11.向斜轴线；12.坝址；A—E.剖面线编号

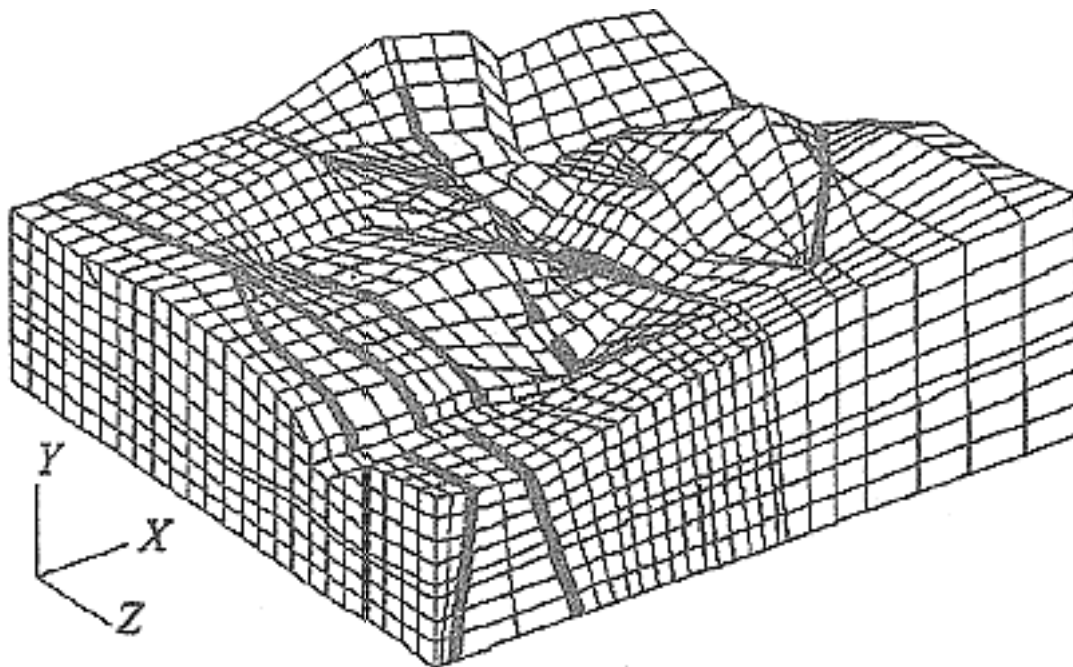


图2 水布垭坝址区应力场模拟有限元模型

Fig.2 The finite-element model for stress field simulation in the Shuibuya dam site

坐标原点在模型的西北底角，X轴向东，Y轴向上，Z轴向南。模型由5785个六面体单元及其蜕化体组成，节点6938个。各工程岩石组合及断裂的力学性质参数，取自长江科学院和宜昌研究所岩体力学实验成果，从下往上三个工程岩石组合密度()分别为 2.70g/cm^3 、 2.00g/cm^3 和 2.70g/cm^3 ，弹性模量E分别为18 000MPa，2 000MPa和45 000MPa，泊松比 μ 分别为0.28，0.35和0.25。对断裂带的上述三个物理参数取值分别为 $\rho=2.60\text{g/cm}^3$ ， $E=6\ 000\text{MPa}$ 和 $\mu=0.30$ 。

模型边界条件为：顶面为自由面，底面Y方向约束；东西两侧X方向约束，南北两侧Z方向约束。由于深切峡谷地区重力是岩体变形破坏的主要力源，构造应力对其应力大小及分布影响甚微^[2]，因此，在计算中把重力作为基本载荷。对垂直方向自重应力按 $\sigma_v = \rho h$ 施加， ρ 为岩石的容重，h为岩体的埋深。

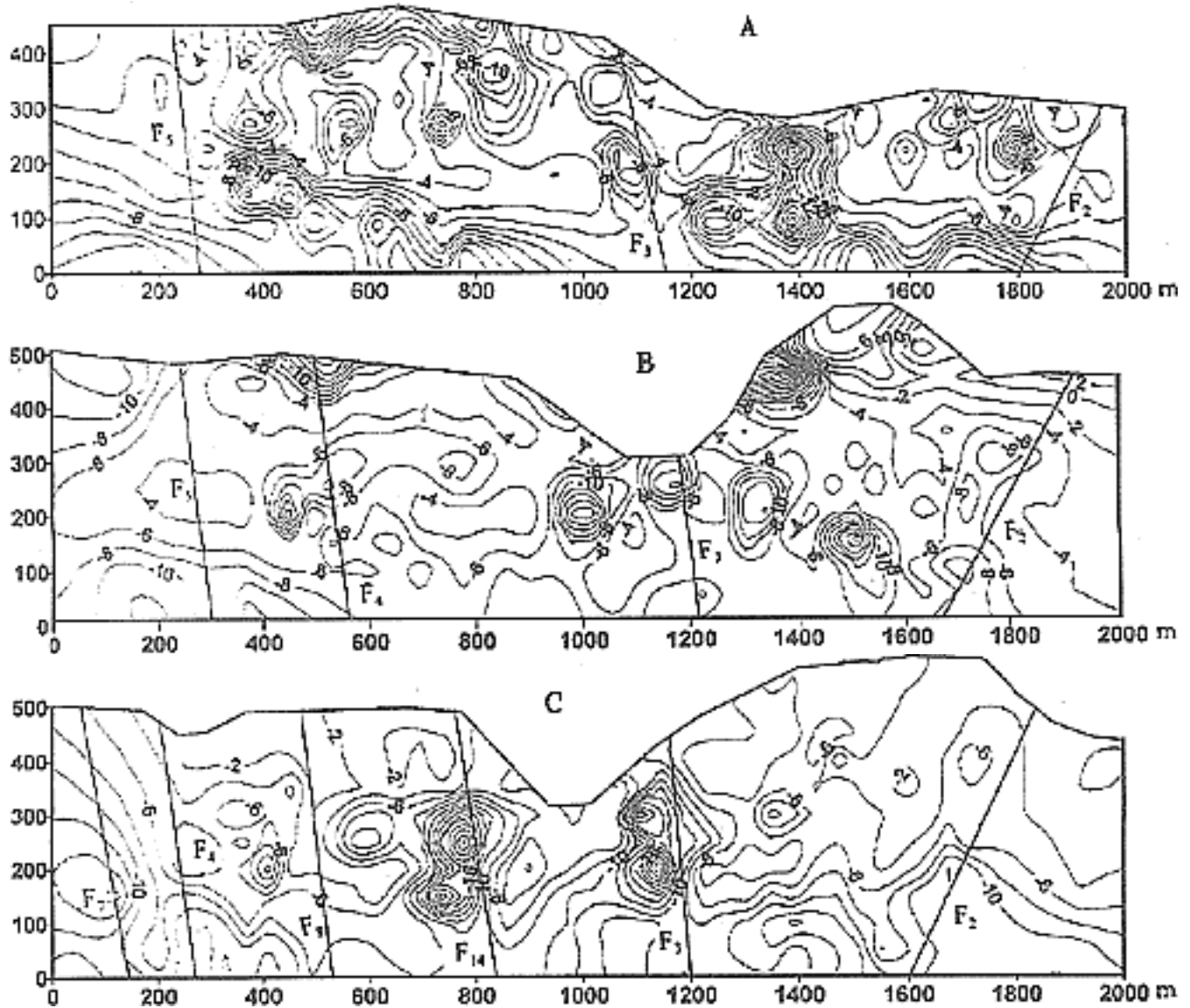
2 岩体应力场与位移场计算结果分析

模型建立后，采用Super SAP有限元软件在586微机上计算。为便于了解岩体三维应力和位移特征，对计算结果进行了三维空间主应力立体显示，并选取5个EW向代表性剖面分别进行最大主应力、最小主应力、最大剪应力、EW向水平位移和垂直位移的分析，全套应力和位移图共42幅。本文仅给出其中的4幅最大主应力图。这5个剖面分别经过大崖〔A剖面〕、马崖〔B剖面〕、坝轴线〔C剖面〕和坝址上游东西向清江左岸〔D剖面〕及右岸〔E剖面〕，剖面位置见图1。这些剖面控制了工程建设所关心的重要部位。

2.1 岩体应力场特征

大崖斜坡(图3A)最大主应力在陡崖临空面附近形成应力低值带，应力等值线平行于临空面，深部形成平行于坡面的应力增高带，坡脚为应力高值集中区，并具有与斜

坡应力增高带相连的趋势。清江右岸的马崖斜坡最大主应力集中区出现在斜坡中部和清江河谷谷底，坡缘区及坡顶面形成张力带，影响深度较大(图3B)。清江左岸斜坡应力等值线与临空面大致平行，应力值较低。由于后期断裂带被方解石脉胶结，其强度大大提高，并明显高于煤层组成的软弱滑动带，因此，岩层沿软弱带滑动时遇到断裂时必然受阻，在断裂带附近形成最大主应力集中带(F_3 、 F_8)或应力梯度带(F_2)。沿坝址线两岸斜坡岩体最大主应力值较低(图3C)，除在河谷左、右岸斜坡深部沿 F_3 和 F_{14} 形成最大主应力集中外，没有明显的应力集中，河谷谷底应力值较小。坝址上游最大主应力受陡倾断裂和缓倾剪切带的联合控制，断裂对应力传播起着明显的阻隔作用，应力高值区集中在栖霞组和断裂带附近(图3D)。



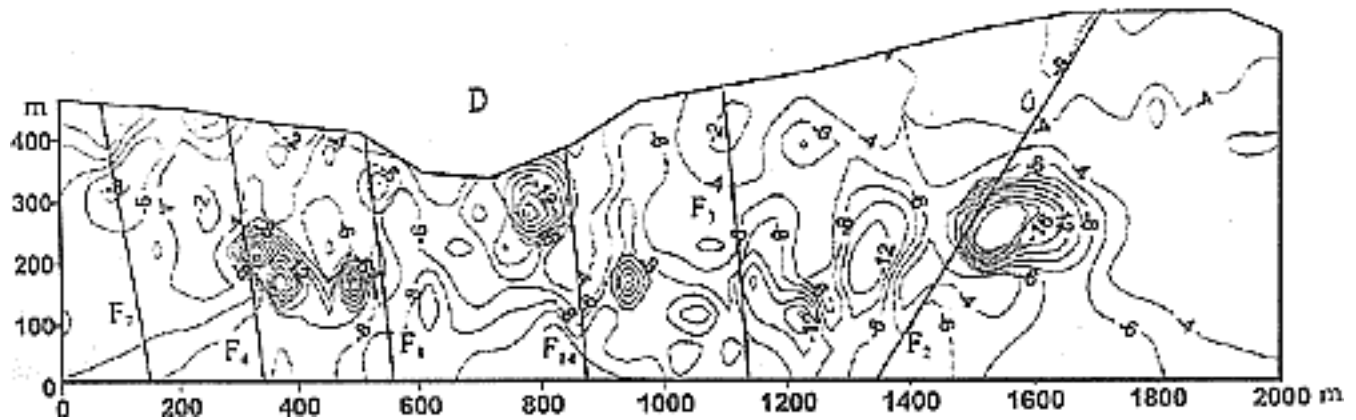


图3 最大主应力等值线图(应力/MPa;负为压,正为拉)
Fig.3 The counter of maximum principal stress

2.2 岩体位移场特征

图4显示了250m深处岩体沿东西向水平位移特征,正值代表向东位移,负值则向西;A、B、C、D代表图3相应剖面的位移曲线。由图可见,下游位移明显小于上游,清江左岸和 F_2 断裂以东岩体位移相对较小,沿清江河谷附近位移相对要大一些。

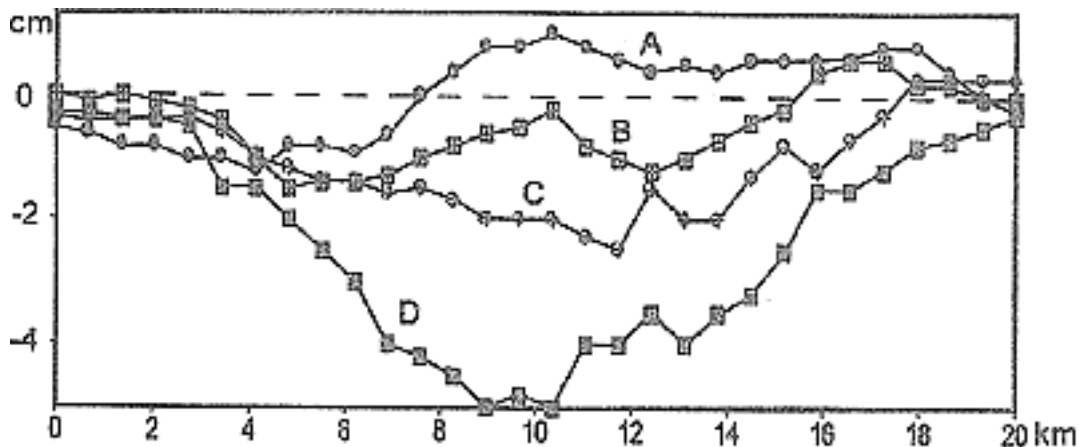


图4 东西向剖面位移等值线图(位移/cm)
Fig.4 The displacement counter of profile in E-W direction

大崖(图4A)在斜坡以东岩体形成向东的侧向位移,大崖坡缘附近及以西岩体以向西滑移为主。陡倾断裂带如 F_2 和 F_5 对位移起阻挡作用,位移量在断裂带附近显著降低。清江右岸大崖斜坡(图4B)除斜坡上部及坡缘区向东位移外,坡脚区和河谷谷底整体沿栖霞组煤层向西位移。位移值相对较小,断裂也具有明显的抑制岩层滑动的作用。在水布垭拟建坝址附近,岩体水平位移以沿栖霞组底部较弱夹层整体向西滑移为特征(图4C),在清江河谷附近具有最大的滑动量,但是左岸斜坡与河谷谷底及右岸斜坡一起向西位移,位移量大体相当,即两坝肩和坝基不存在明显的差异位移。坝址上游岩体水平位移(图4D)总体由东向西滑移,岩体水平位移量明显大于坝址及其下游。

3 结论

(1)最大主应力值集中区受陡倾断裂、缓倾剪切带和地形等因素的影响。应力高值区集中分布于大崖、马崖斜坡及坡脚、坝址右岸斜坡、南部上湾斜坡区。岩体最大主压应力值较低。

(2)模拟结果表明，岩体的水平位移受岩性、地层产状、地形和断裂多种因素影响，特别是栖霞组软弱夹层对其影响最大，其低强度导致岩体沿该层整体由东向西滑动，南部水平位移要大于北部。断裂对水平位移起阻挡作用，有利于岩体的稳定。

基金项目：国家自然科学基金(49772145)，地质力学开放实验室和长江水利委员会委托项目

作者简介：胡道功(1963—)，男，副研究员，主要从事构造应力场及其在地壳稳定性方面的研究。

作者单位：胡道功 石玲 谭成轩 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；

徐瑞春 梅应堂 水利部长江水利委员会三峡勘测研究院，湖北 宜昌 443003.

参考文献

- [1] 简文星，吴树仁，徐瑞春.清江水布垭坝址软弱夹层变形机制分析 [J] .地质力学学报，1996，2(4)：43-48.
- [2] Pan E,Amadei B,Savage W Z.Gravitational and tectonic stresses in anisotropic rock with irregular topography [J] .Int.J.Rock Mech.Min.Sci.& Geomech.Abstr.,1995,32：201—214.
- [3] 李功伯，谢建清.滑坡稳定性分析与工程治理 [M] .北京：地震出版社，1997.49—53.

收稿日期：1999-04-10