

# 锦屏 I 级水电站解放沟左岸边坡倾倒变形机制的 3D 数值模拟

徐佩华<sup>1</sup>, 陈剑平<sup>1</sup>, 黄润秋<sup>2</sup>, 严 明<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:** 为研究某一边坡的变形机制问题, 采用 3D- $\sigma$  模拟了地质体演化机理, 用 FLAC-3D 模拟与 3D- $\sigma$  的模拟结果相互验证; 获得了河谷下切过程中边坡的变形特征, 揭示左岸边坡的变形破裂形成机制。经分析得出如下主要结论: 从地应力的角度分析河谷边坡变形的成因机制是切实可行的方法; 坡体的卸荷促进弯曲倾倒变形的进行, 并为它划定界限; 作者提出的解放沟左岸边坡变形的成因机制是合理的; 卸荷回弹也是促进倾内层状体边坡中深层弯曲倾倒变形进行的起始因素, 并为变形划定界限; 倾倒变形的破坏面是双折线型的。

**关 键 词:** 边坡; 倾倒; 变形机制; 三维数值模拟

**中图分类号:** TU457 TV223.3    **文献标识码:** A

## 1 引言

倾倒破坏是岩质边坡失稳的一种典型形式, 从 20 世纪 70 年代以来岩土工程界逐渐关注此问题, 很多论文对其破坏机理进行了研究<sup>[1]</sup>。倾倒运动研究方法通常有物理模拟方法、运动学分析法、极限平衡分析法及数值模拟法等。基于极限平衡原理的倾倒稳定分析方法(简称 G-B 法)最早由 Goodman 和 Bray(1976)<sup>[2]</sup> 提出。尔后, 由 Caner Zanbak, Aydan Omer, Davies, Bobet, Scavia 等人建立了基于静力平衡方法的倾倒破坏问题的分析方法<sup>[4~8]</sup>。然而, 这些经典极限平衡方法仅仅能够确定规则几何形状和受简单荷载作用的倾倒破坏边坡的稳定性, 考虑的是均匀介质的简单破坏模式, 这与边坡倾倒变形受反倾结构面决定性控制<sup>[9]</sup> 的实际情况相差甚远。这些限制制约了块体倾倒破坏分析方法的推广应用。最近的十几年, 数值模拟技术在连续介质和非连续介质边坡稳定性问题分析中都有了极大的提高, 被证明其在各种分析倾倒变形的工具中是最有力的分析工具<sup>[2]</sup>。它对原型的反映不仅仅是单变量的趋势相似, 而且模型本身能反映滑坡体的形成机制<sup>[10]</sup>。而变形破坏机制分析的主要目的是为了“理解机制”, 并非精确的定量计算<sup>[11]</sup>。因此, 本文结合雅砻江锦屏一级水电站坝前解放沟左岸反倾高边坡变形体的成因机制问题, 对倾倒变形机制进行了 3D 数

值模拟分析。

## 2 解放沟工程地质条件及变形机制

解放沟河段为解放沟至普斯罗沟之间 1.5 km 长的河段, 河道顺直, 流向 N25°~35°E, 河谷呈 V 型, 坡度 40°~50°。该段河段是由 T<sub>2-3z</sub><sup>2</sup> 大理岩及 T<sub>2-3z</sub><sup>3</sup> 变质砂板岩组成的纵向河谷, 左岸为反向坡, 右岸为顺向坡。大理岩分布于右岸、河床、左岸谷坡下部及左岸 2 070 m 高程以上的谷坡, 左岸谷坡 1 720~2 070 m 高程分布变质细、粉砂岩及泥质板岩互层, 按岩性组合可细分为 5 层(图 1)。岩层走向与边坡走向夹角小于 25°, 左岸边坡属典型的反倾向层状结构岩质边坡, 岩层倾角大于 30°, 边坡变形的主要形式将会是弯曲倾倒变形<sup>[12]</sup>。

勘探揭露左岸边坡变形分浅层变形和深层变形, 浅层变形主要发生在边坡的中上部, 从 1 824 m 高程的 JD4 号硐揭露的情况看, 主要发生在硐深 60 m 以外, 是砂板岩构成的反倾层状岩质边坡的弯曲—倾倒—拉裂变形。深部变形的形成机制是争论的焦点, 作者认为是河谷快速下切过程中边坡发生深部卸荷松弛和倾内层状体斜坡的深部岩层弯曲倾倒共同作用所致。作者已有文章专门从地质现象、测年资料角度进行了论述, 这里将用 3D 数值模拟的方法进行计算、分析。

收稿日期: 2003-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(No. 40272117)

作者简介: 徐佩华(1979—), 女, 浙江省永康市人, 吉林大学博士研究生, 工程地质与地质灾害专业。

### 3 3D- $\sigma$ 有限元模拟及结果分析

#### 3.1 关于模型

对地质原型进行了如下概化:

a. 模型范围: 平面上, 模型上、下游边界大体与河流走向垂直, 分别取至如图 1 所示横剖面图的上游 692.2 m、下游 495.2 m; 两岸边界大体与河流走向平行, 在坐标轴上分别取至左岸为 -1 024 m, 右岸为 2 354 m; 模型底面取至 -200 m 高程。解放沟段河流流向取 N28°E, 模型的 Z 轴方向与河流方向一致, X 轴方向与图 1 横剖面方向 (N52°44'54"E) 一致, Y 轴方向为高程, Y=0 处相对于高程 1 300 m。

b. 断层及层间挤压带: 左岸 F5、F8 断层, 右岸 F3 断层。断层 F5 在 Z=337 m 处有所转折, 宽取 3 m; 断层 F8 在 Z=259.4 m 处有所转折, 宽取 2 m, 层间挤压带 G1 宽取 2 m。

c. 岩体: 各层岩石厚度按已知各剖面揭露的岩层厚度取平均值。此模型完整的再现了以 T<sup>3</sup>(5) 为核心的向斜。

d. 阶地: 根据区内地形、地貌特征, 大体上将雅砻江河谷演化分为七级阶地, 见表 1。

e. 岩体、断层和层间挤压带的力学参数见表 2。

f. 边界条件: 模型侧边界为 X、Z 方向单向约束; 底边界为 Y 方向单向约束, 谷坡表面为自由边界。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, 因此, 在计算中把重力作为基本载荷。

#### 3.2 计算结果分析

计算采用三维弹性有限元 (3D- $\sigma$ ) 进行, 全部

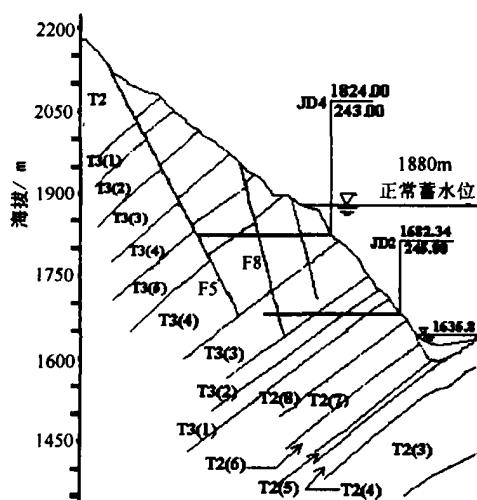


图 1 解放沟下游 692 m 处左岸地质横剖面图  
(I—I 勘探线剖面图)

计算过程分为 8 个阶段, 每个阶段相对应于某一级阶地, 其目的在于模拟雅砻江河谷下切过程中地应力分布的变化, 在最后一个阶段, 即现在的河谷地形, 通过分析地应力的分布来解释解放沟左岸的地貌现象。模拟结果表明, 伴随着河谷的快速下切, 主应力将发生明显的集中与分异, 在 F8、F5 断层之间区域, 近地表处开始出现拉应力区或应力降低区, 并随河谷下切而向下有所扩展。现对河谷下切至现今河床位置时的应力降低区进行分析, 分为浅部和深部, 如图 2。结果显示: 岩层应力降低区主要在 F5 断层以外区域, 沿 F5、F8 断层呈串珠状分布, 其下缘位置, 已扩展到 1 780~1 800 m 高程附近; 浅部岩层应力降低区的水平深度大约在 60~68 m 以外, 这是

表 1 各级阶地表

剥夷面或阶地	拔河高度或海拔/m
2 130 m 剥夷面	海拔 2100
VII阶地	拔河 380
VI阶地	拔河 340
V阶地	拔河 265
IV阶地	拔河 165
III阶地	拔河 90
III阶地	拔河 90
II阶地	拔河 40
I阶地	拔河 20

表 2 部分岩层 断层 层间挤压带的部分参数

岩性	弹性模量/ MPa	泊松比
F3	1 000	0.3
F5	1 000	0.3
F8	1 000	0.3
G1	1 300	0.29
T <sup>3</sup> (1)	13 000	0.26
T <sup>3</sup> (2)	21 000	0.25
T <sup>3</sup> (3)	13 000	0.26
T <sup>3</sup> (4)	21 000	0.25
T <sup>3</sup> (5)	21 000	0.25

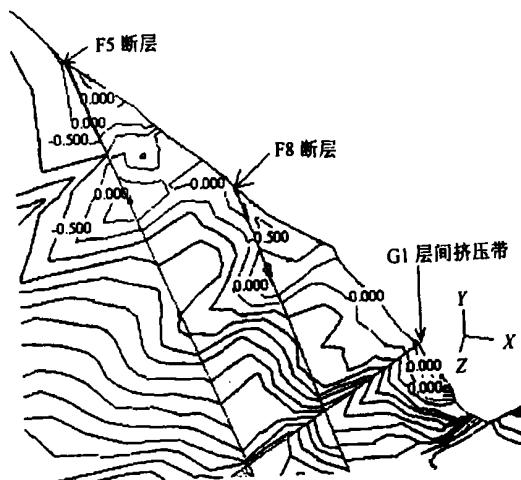


图 2 第八阶段 I 勘线左岸边坡最小应力等值线局部放大图  
(单位: MPa)

卸荷回弹区,引起原有结构面的松弛,较软岩层的变形以及较硬岩层的破裂以便重新调整平衡,这种卸荷只需很短的时间就能完成,之后开始弯曲倾倒变形。现有的浅层弯曲倾倒变形体的界线也确定在60 m左右,显然浅部岩层的卸荷促进了倾倒变形的进行,并为之划定了界线;深部岩层应力降低区的高程均在河谷卸荷基准线(位置大致是1700~1720 m高程)以上。深部岩层的应力释放,势必也会导致卸荷回弹,引起原有结构面的松弛、较软岩层的变形以及较硬岩层的破裂以便重新调整平衡。同时也可推断,深部卸荷回弹的进行也会促进反倾层状体深部弯曲变形的进行,并为它划定界限。这就很好的解释了深裂缝的成因机制。

#### 4 变形机制的 FLAC—3D 模拟

用 FLAC—3D 进行模拟,一方面可以获得河谷应力场的形成与演化特征,从而可与 3D— $\sigma$  的模拟结果相互验证;二方面可以利用 FLAC—3D 强大的变形计算分析功能,获得河谷下切过程中边坡的变形特征,进一步从变形的角度直观地再现边坡的变形破坏形成的全过程,揭示左岸边坡的变形破裂形成机制,科学地评价边坡的变形稳定性。

##### 4.1 模型的建立与参数的选取

FLAC—3D 的模型是通过接口程序,直接从 3D—sigma 模型导入,因此采用的是同一概化模型。需要特别说明的有以下几点:

a. 河谷下切模拟只进行了 4 个阶段,各阶段模型河床高程分别为 1987、1812、1687、1600 m(即现今河谷)。

b. 进行河谷下切过程模拟时,需剪切模量和体积模量参数:  $G = \frac{E}{2 \times (1 + \mu)}$ ;  $K = \frac{E}{3 \times (1 - 2 \times \mu)}$   
( $\mu$ : 泊松比;  $E$ : 弹性模量;  $G$ : 剪切模量;  $K$ : 体积模量)。

##### 4.2 河谷下切过程的 FLAC—3D 模拟结果分析

河谷下切过程模拟分 4 个阶段进行,每一阶段迭代 2000 步,共进行了 8000 步。为了解河谷下切所引起的变形,在初始阶段(第一阶段)的迭代计算完成后,对系统的位移、速度进行清零,以后各阶段迭代计算完成后不再清零,即第二、三、四阶段的位移均是累加的结果。模拟计算发现,FLAC—3D 计算所得出的边坡应力场结果,与 3D— $\sigma$  的模拟结果相似,这里不再赘述。下面重点分析左岸边坡的变形及其发展过程。

a. 从位移计算结果图看,河谷下切过程中,边

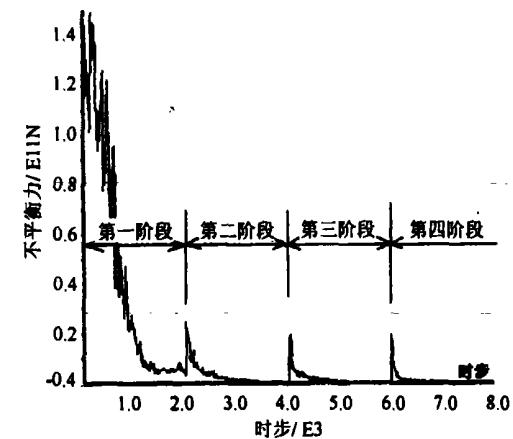


图 3 河谷下切过程中系统不平衡力演化过程曲线图

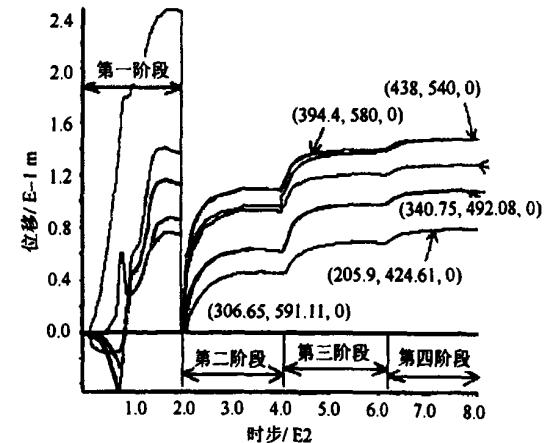


图 4 河谷下切过程中 I 剖面跟踪点的水平位移( $U_x$ )时步曲线  
坡总体向上、向坡外发生位移,暂且称之为“斜向回弹”。这种斜向回弹变形的范围主要限于 F5 (尤其是 F8) 断层以外、当时河床高程以上的坡体内区域。在这一区域的下部,垂直向上的位移( $U_y$ )量值明显大于朝向河谷的位移( $U_x$ )量值,在这一区域的上部,  $U_y \approx U_x$ 。随着河谷的下切,这一回弹变形区逐渐向下扩展。

b. 伴随着 F5 断层以外坡体的斜向回弹, F5、F8 断层发生了明显的松弛—拉张,其松弛—拉张的垂直深度范围大体从面向下到(当时的)河床高程(或河床高程以上某个位置)。随着河谷的下切,松弛—拉张的垂直深度逐渐增大。

c. 从整个边坡系统的不平衡力演化过程曲线(图 3)看,各个阶段在迭代进行到一定时步后,整个系统的不平衡力趋于收敛,表明各阶段的河谷下切完成后,随着时间的进行,变形和应力发生调整,边坡整体上达到自我平衡状态。

d. 从设置于边坡的位移跟踪点的  $U_x$ —时步曲线图(图 4)看,在每一下切阶段,当迭代进行到一定时步后,水平位移( $U_x$ )量值趋于恒定,即变形趋

于收敛。这表明前述左岸边坡的变形具有“应力释放型”的特点，即属于卸荷回弹性质。

e 图 5 为第四阶段(现今河谷) I 剖面左岸总位移图, 从图中可看到, 颜色最深(也就是变形量最大)的变形区域范围界线形状是很清晰的双折线, 这部分岩体的变形最严重, 边坡若破坏也将是这部分岩体失稳, 而且是沿着这个界线失稳。

综上所述, FLAC—3D 数值模拟较好地再现了左岸边坡变形破裂的形成过程, 即目前边坡内所揭露的深部松弛—拉裂(如沿 F5 断层等), 是一种高地应力条件下, 伴随着河谷的快速下切, 坡体地应力强烈释放, 边坡发生深部卸荷(破裂)所致。一旦应力释放完毕, 变形旋即趋于稳定, 尔后进入重力作用变形, 对典型的反倾层状结构边坡来说, 就是目前, 左岸边坡虽已进入时效变形阶段, 但是处在时效变形阶段的初始阶段, 且变形非常缓慢, 因此, 在天然情况下, 边坡整体稳定性是比较好的。

## 5 总结

从地应力的角度着手分析河谷边坡变形的成因机制是既科学又切实可行的方法, 这与陈宗基教授就岩石力学发展方向所指出的“毫无疑问, 初始应力分布应该作为我们设计和分析的基础”是完全一致的。因此用 3D— $\sigma$  有限元通过河谷下切过程中应力的变化来进行成因机制的模拟分析和 FLAC—3D 模拟河谷下切过程中边坡的变形过程, 既可以相互验证又可以多角度分析问题, 是一种值得推广的方法。

## 参考文献

- [1] 孙东亚, 彭一江, 王兴珍. DDA 数值方法在岩质边坡倾倒破坏分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 39—42.

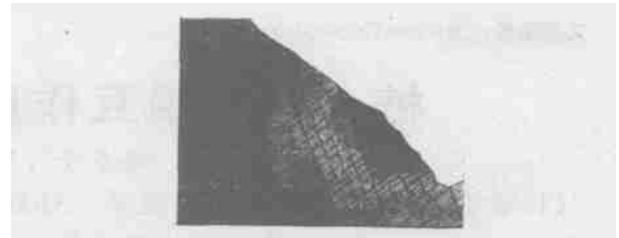


图 5 第四阶段(现今河谷) I 剖面左岸总位移图

- [2] Benko, Boris. Numerical modelling of complex slope deformations[J]. Dissertation Abstracts International, 2001, 58(12): 6791.
- [3] Goodman R E, Bray J W. Toppling of rock slopes[A]. Proceedings of the Speciality Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes[C]. ASCE / Boulder, Colorado, 1976.
- [4] Caner Z. Design charts for rock slopes susceptible to toppling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1982, 109(8): 1039—1061.
- [5] Aydan O, Kawamot T. Toppling failure of discontinuous rock slopes and their stabilization[J]. Nippon Kogyo Kaishi / Journal of the Mining & Metallurgical Institute of Japan, 1987, 103(1197): 763—770.
- [6] Davies P, Williams A T, Bomboe P. Numerical modeling of lower liai rock failures in the coastal cliffs of South Wales[A]. Proc Spec Conf Quant Approaches Coastal Sediment Process[C]. Publ by ASCE, New York, NY, USA. Coastal Sediments' 91; 1991, 2: 1599—1612.
- [7] Bobet A. Analytical solutions for toppling failure[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36: 971—980.
- [8] Scavia C, Barla G, Bemaudo V. Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1990, 27(6): 465—478.
- [9] 韩贝传, 王思敬. 边坡倾倒变形的形成机制与影响因素分析[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 213—217.
- [10] 赵其华, 王兰生. 边坡地质工程理论与实践[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000.
- [11] Fairhurst C. 岩土工程中锚固的数值研究[A]. 国际岩土锚固与灌浆新进展[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [12] 陈祖煜. 岩质高边坡稳定性分析方法与软件系统[J]. 水力发电, 1998, (3): 48—51.

## Analyses of 3D numerical simulation of toppling deformation mechanism of Jiefanggou left slope in Jingping Step 1 hydropower station

XU Pei-hua<sup>1</sup>, CHEN Jian-ping<sup>1</sup>, HUANG Run-qiu<sup>2</sup>, YAN Ming<sup>2</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;  
2. Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The paper discussed the problem of the slope's deformation mechanism. It adopted 3D- $\sigma$  limit elements numerical modeling and FLAC-3D numerical modeling. The purpose of 3D- $\sigma$  modeling was the knowledge of slope evolvement mechanism. The purpose of FLAC-3D had two. The one of them was reciprocally validate results between the 3D- $\sigma$  and FLAC-3D, and the other got deformation characters in cutting valley to understand the deformation cracking mechanism of left slope. The paper gained some conclusions by analyzing. The way that deformation mechanism of valley slope is analyzed from the point of terra stress is feasible. The unloading of slope accelerated the developing of bending and toppling deformation and drew a line of demarcation. The deformation mechanism of Jiefanggou left slope that is explained by author is rational. The unloading of slope also accelerated the developing of deep bending and toppling deformation and drew a line of demarcation too. The figure of breakage face of toppling deformation is double fold line.

**Key words:** slope; toppling; deformation mechanism; 3D numerical simulation