

学术论文



三峡大坝左岸3号坝段稳定性的

数值分析和试验研究

任青文, 余天堂, 马良筠
(河海大学土木工程学院, 南京)

[摘要] 三峡大坝左岸1#~5#厂房坝段稳定性是工程的关键问题之一。采用弹塑性块体单元法对3#厂房坝段的稳定安全度进行了研究, 块体单元法是一种以块体单元形心的刚体位移为基本未知量的数值分析方法, 它可以精确和方便地模拟岩体结构面, 能够较好地解决非连续介质的力学问题。它在稳定性分析方面的正确性被室内模型试验所证实, 两者的结果相当一致。文章最后给出应用该法分析三峡大坝3#厂房坝段在多种工况下的稳定性分析成果。

[关键词] 三峡大坝; 弹塑性块体单元法; 模型试验; 稳定性分析

1 数值分析方法及成果

1.1 块体单元法

目前, 在根据数值分析成果进行重力坝稳定性分析时, 多采用有限元方法。由于三峡大坝左岸3#厂房坝段地基的地质条件复杂, 结构面众多, 采用块体单元法^[1]可以极方便和精确地模拟这些结构面, 还能减少输入的数据量和计算的工作量。因此, 笔者采用可解决非连续介质力学问题的弹塑性块体单元法计算坝基的位移和应力场。

块体单元法以块体形心处的刚体位移作为基本未知量, 即用分片的刚体位移模式逼近实际位移场, 在块体单元之间设“缝”单元, 反映结构的弹塑性。根据虚功原理求出各块体形心处的刚体位移后, 由缝单元两侧块体的相对位移确定缝面的变形和应力。

假定计算范围内共有 n 块可动的块体单元, 在外力作用下, 其中第 i 块的刚体位移为

$$\{\delta_i\} = [U_i \ V_i \ W_i \ \theta_{xi} \ \theta_{yi} \ \theta_{zi}]^T \quad (1)$$

式中 U_i 、 V_i 、 W_i 、 θ_{xi} 、 θ_{yi} 、 θ_{zi} 分别是该块体单元在整体坐标系 xyz 下沿坐标轴方向平移和绕坐标轴的转角。则块体内任一点 (x, y, z) 的位移为

$$\{f_i\} = [u \ v \ w]^T = [A_i]\{\delta_i\} \quad (2)$$

式中

$$[A_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z - z_{ci} & -y + y_{ci} \\ 0 & 1 & 0 & -z + z_{ci} & 0 & x - x_{ci} \\ 0 & 0 & 1 & y - y_{ci} & -x + x_{ci} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

x_{ci} 、 y_{ci} 、 z_{ci} 为第 i 块体形心的整体坐标。

三峡工程左岸1#~5#厂房坝段的建基面高程为▽85.0~▽90.0m, 而坝后厂房的建基面高程为▽22.2m, 因此大坝坝趾后面形成高陡边坡。坝基岩体为坚硬的花岗岩, 但岩体内发育有基本倾向下游, 倾角小于30°的缓倾角结构面, 还有少量倾向下游的中倾角裂隙, 这些结构面大部分在高边坡处露出, 且材料的抗剪强度较低, 对坝基及边坡的稳定不利。因此左岸1#~5#厂房坝段的稳定性研究显得尤为重要, 是三峡大坝工程的关键问题之一。特别是3#坝段由于其坝基结构面多, 稳定性更差, 为此, 笔者采用弹塑性块体单元法模拟实际施工过程, 对3#坝段进行仿真数值分析, 研究其稳定性, 并通过室内模型试验验证了数值分析结果的正确性。

[收稿日期] 1999-07-12

[作者简介] 任青文(1943-)男, 河海大学教授, 博士生导师

根据最小势能原理可导出块体单元法的支配方程

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (4)$$

$$[K] = \sum_e ([c]^e)^T$$

$$\int_v t_0^{-2} [A]^T [L]^T [D_{ep}]$$

$$[L][A] dv [c]^e \quad (5)$$

式中, t_0 为块体之间的缝面厚度, $[L]$ 为缝面局部坐标与整体坐标之间的方向余弦矩阵, $[D_{ep}]$ 为缝面材料的弹塑性矩阵, $[c]^e$ 为单元选择矩阵, $[A] = [[A_i] \quad -[A_j]]$ 。由式 (4) 求出整体刚体位移列阵 $\{\delta\}$, 并据此确定缝单元的应变和应力。

根据变形相等的原则, 可将块体的变形考虑到缝面的材料性质中, 此时可得到等效的弹塑性矩阵 $[D_{ep}]$ 。

从以上推导可知块体单元法既具有刚体极限平衡法的特点, 又具有有限元方法的优点。而且, 块体单元法克服了位移有限元应力不连续的缺点, 提高了应力精度, 使稳定安全系数的计算更为可靠。因此, 块体单元法特别适用于具有软弱结构面的岩体的稳定分析。

1.2 稳定性分析方法及失稳判据

本文采用弹塑性块体单元法的位移和应力成果进行坝体的稳定分析。由于基础地质构造的复杂性, 滑移面难以事先确定。对于两个滑移面以上的复合滑移面, 也难以根据应力成果采用传统的方法合理地确定整体抗滑稳定安全系数。为此, 可采用按同一比例 K 加大荷载或改变材料强度指标的方法确定超载安全系数或强度储备安全系数 K_c 。

坝体失稳的评判准则为: 关键点 (本文采用坝踵结点) 位移发生异常改变, 即当材料强度改变 K 倍时, 该结点的水平位移 u 与 K 的关系曲线产生突变, 则此时的 K 为 K_c ; 屈服区连通, 当材料强度改变 K 倍时, 基础内的屈服区连通, 形成一个滑移通道, 则此时的 K 为 K_c 。

1.3 计算模型

采用平面弹塑性块体元方法对厂 3# 钢管断面和非钢管断面 (图 1) 的稳定性进行研究, 计算范围为垂直方向取坝基以下 150m, 水平方向的宽度为 340m。图 2 示出厂 3# 坝段地基概化地质图, 计算模型中如实地考虑了所有的实际结构面、概化结构面及岩桥。钢管断面的块体元离散模型由 596 个结点和 1804 个单元组成, 其中块体单元 637 个, 缝单元 1167 个。非钢管断面的块体元离散模型由

579 个结点和 1736 个单元组成, 其中块体单元 626 个, 缝单元 1137 个。

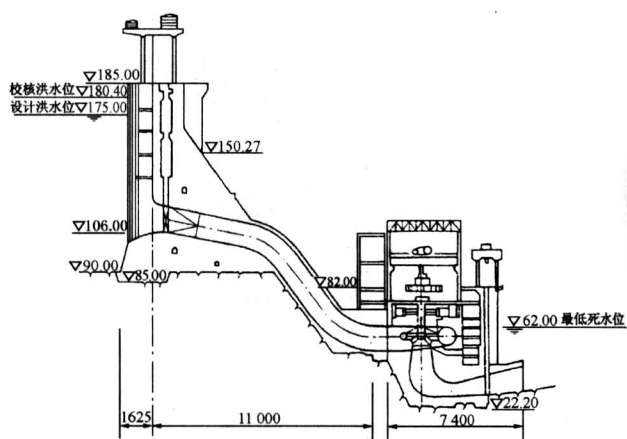


图 1 厂 3# 坝段 (单位: m)

Fig.1 Dam section No.3 of powerstation (unit: m)

1.4 材料参数

厂 3# 坝段坝体混凝土及地基的材料物理力学参数列于表 1。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	抗剪强度		容重 /kN·m ³
			f	c/MPa	
混凝土	26	0.167	1.1	3.0	24.5
岩体	35	0.23	1.7	2.0	27.0
岩体结构面	35	0.23	0.7	0.2	0.0
岩桥	35	0.23	1.585*	1.793*	0.0
坝基接触面	26	0.167	1.1	1.3	0.0
厂基接触面	22	0.167	1.25	1.5	0.0
厂房实体	22	0.167	1.1	3.0	24.5

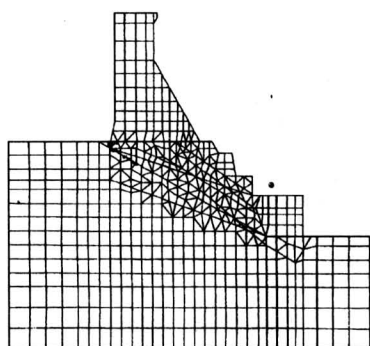
* 为岩桥的抗剪强度, 按连通率 $n = 11.5\%$ 加权平均得到。

1.5 与试验对比的工况及计算成果

作用在坝体及岩基上的荷载有上下游水压力, 自重, 渗透压力和地应力。由于室内试验无法模拟渗压, 所以计算分析也不考虑渗压。地应力场以岩体的自重应力场代替, 因而计算工况为:

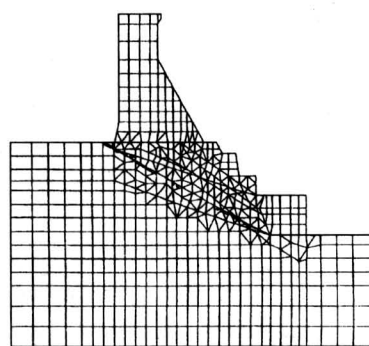
岩体自重应力场 + 坝体及厂房自重 + 上游水压 (水位 $\nabla 175.0\text{m}$) + 下游水压 (水位 $\nabla 62.0\text{m}$)

稳定分析的断面为 3# 非钢管断面, 滑移面为折面, 即图 2 中的 JI 和 $\nabla 22.0\text{m}$ 高程的厂房建基面。由表 1 可知 JI 结构面的 $f = 0.7$, $c = 0.2\text{MPa}$,



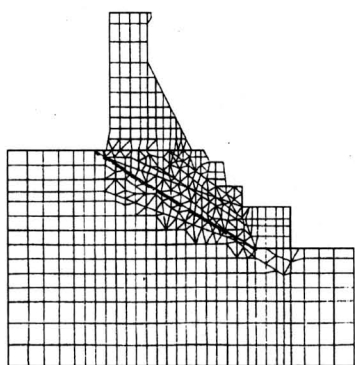
(1) K=3.0 时基岩屈服情况

(1) Yielded condition of foundation at K=3.0



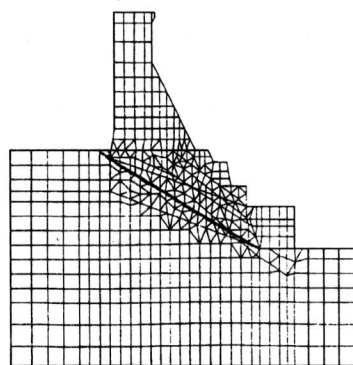
(2) K=4.0 时基岩屈服情况

(2) Yielded condition of foundation at K=4.0



(3) K=5.0 时基岩屈服情况

(3) Yielded condition of foundation at K=5.0



(4) K=6.0 时基岩屈服情况

(4) Yielded condition of foundation at K=6.0

图 3 不同超载比时基岩屈服情况

Fig.3 Yielded condition of foundation under different loading ratio

表 2 模型材料的材料特性

Table 2 Material characteristics of model materials

模型部位	原型容重 $r_p / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	模型理论 容重 r_m / $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	模型实际 容重 $r_m / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	原型弹模 E_p / MPa	模型理论 弹模 E_m / MPa	模型实际 弹模 E_m / MPa	原型摩擦 系数 f_p	模型摩擦 系数 f_m	原形凝聚力 C_p / MPa
厂房坝体	24.5	24.5	25.0	26000	173.3	164.6			
岩体	27.0	27.0	26.4	35000	233.3	283.5			
岩体结构面							0.70	0.71	0.2
厂房基岩 结构面							1.25	1.25	1.5

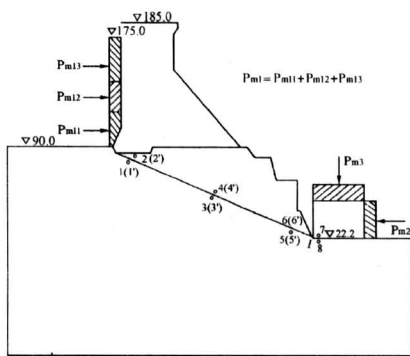


图 4 加载布置图

Fig.4 Loading arrangement

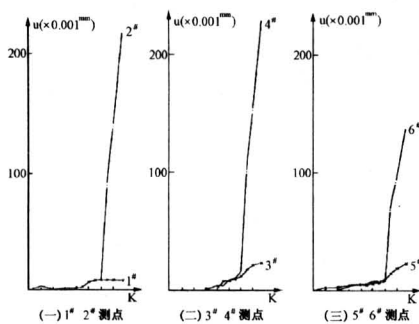


图 5 加载比 K 与位移 u 的关系曲线

Fig.5 Loading ratio K vs displacement u

表 3 3# 厂房坝段的稳定安全系数 Kc

Table 3 Stability safety factor Kc of Dam section No. 3

计算工况	工况 A		工况 B	
失稳判据	位移变化率	屈服区连通	位移变化率	屈服区连通
钢管断面	4.0~4.9	4.0~4.9		
非钢管断面	4.4~5.4	4.4~5.4	3.4~4.6	5.2~5.3

析成果，该成果考虑了厂房和坝体的联合作用。相应的滑移面为图 2 中的 JLMCP……

4 结论

弹塑性块体单元法可以方便地模拟岩体的结构面，它不仅具有比较严密的理论基础，其进行岩体稳定性分析的正确性也被室内模型试验所证实。

采用弹塑性块体单元法对三峡大坝左岸 3# 厂房坝段的稳定性研究的成果表明，根据现有的地质资料（包括结构面的分布、产状、连通率和材料力学参数）及指定的荷载工况，其稳定性是足够的。此外，要采取有效的工程措施，以保证厂房和大坝基岩的连接，使厂坝可以联合作用。

参考文献

- [1] 任青文、余天堂. 弹塑性块体单元法的理论和计算模型. 工程力学, 1999, (1): 67~77

Numerical Analysis and Experiment Study of Stability for Dam Section No.3 of the Three Gorges Project

Ren Qingwen, Yu Tiantang, Ma Liangyun

(College of Civil Engineering of Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

[Abstract] One of the important problems for the Three Gorges Project is the stability for dam section No.1 ~No.5 at left bank. The stability safety of dam section No.3 is studied with elasto-plastic Block Element Method (BKEM) in the paper. BKEM is a numerical analysis method. The basic unknown quantities of BKEM are the rigid displacements of the central points of block elements. Structure interface can be precisely and conveniently simulated in the method, and mechanical problem of discontinuous medium can be better. The correct ness of stability analysis of BKEM is proved with indoor model experiment and the two results are very consistent with each other. Finally, the result of stability analysis for dam section No.3 under several conditions is presented.

[Key words] Three Gorges dam; elasto-plastic BKEM; model experiment; stability analysis