

李家峡 II[#] 滑体滑动性态的三维有限元分析*

李 宁 韩 炬 陈飞熊

(西安理工大学水电学院 西安 710048)

摘要 针对李家峡水电站 II[#] 滑坡体的工程地质特性与物理力学性质, 根据其宏观稳定性态反演推算出滑面的 c , φ 值; 采用非线性弹性、弹塑性介质力学模型模拟水位变化时的渗透动水压力作用, 对该滑坡体的滑动性态、滑速、涌浪作了系统的三维有限元分析与评价, 为该工程的安全合理拉闸蓄水提供了科学依据。

关键词 李家峡, 滑体, 三维有限元, 渗透压力, 滑速, 涌浪

1 引言

李家峡水电站坝址上游左岸 750m 处分布有大型顺层岩质滑坡体——II[#] 滑坡体。其总体积为 $1\ 405 \times 10^4 \text{m}^3$, 前缘出口高程 2 040~ 2 060m, 后缘高程 2 265m, 高出库水位 240 多米。总的来看, 该滑体具有上缓下陡的地形特征 (30~ 50°), 由第三系红层和前震旦系片岩构成。主滑带厚 0.8~ 1.5m, 由片状破碎岩、岩块、岩屑和泥质物组成, 结构较松散, 其中泥质物厚 1~ 5cm, 以壤土为主, 还有少量粘土。滑面光滑如镜, 擦痕倾向河床。

滑坡成因与机制分析表明, 十分发育的层间弱面构成了向河床临空的不稳定岩体, 水库建成后, 不同的蓄水位将引起滑体的不同程度失稳。本文的目的是参照奥地利格帕奇水库控制滑坡缓慢下滑的先例, 通过控制蓄水位来严格控制滑体的下滑速度, 使不致引起太高的涌浪。为此需要分析滑体的动力学与运动学特性, 通过三维有限元分析研究当库水位上升或下降到不同水位时, 对滑体内部和滑动面上的应力状态的影响, 对滑体滑动的加速度、峰值速度的影响, 确定库水位以怎样的运行方式才能确保对滑体下滑速度的控制, 为分期安全蓄水提供科学依据。

2 滑动带强度参数的反演

2.1 有限元模型

选取 II[#] 滑坡体的下游段 II-2 区作为计算对象。计算区域为长 620m, 宽 320m, 高 200m 的一个自然实体。沿长度剖分为 10 个剖面, 各剖面划分约 100 个 20 结点高精度曲

1996年6月24日收到初稿, 1996年9月12日收到修改稿。

* 本课题同时受到国家自然科学基金与成都理工学院工程地质重点实验室开放基金的资助。

边实体等参元, 滑面上设置 16 结点高精度曲面摩擦-接触型界面元。结点总数 3 401, 方程总数 $3\ 401 \times 3 + 168 \times 24 = 14\ 235$ 。

2.2 强度参数的有限元反演分析

根据滑体在枯水位 2 040m 时处于稳定状态, 而超过水位 2 127.5m 时滑体开始缓慢滑动这一现实宏观条件, 分别按 2 040m 和 2 127.5m 水位下的渗透压力, 以三维弹塑性有限元分析滑动面上的压、剪应力分布, 确定两种水位下的滑体安全系数, 即

$$\frac{L_i c + \frac{\sigma_i^0 L_i \operatorname{tg} \phi}{\tau_i^0}}{\tau_i^0} > 1.0 \text{ 及 } \frac{L_i c + \frac{\sigma_i^\omega L_i \operatorname{tg} \phi}{\tau_i^\omega}}{\tau_i^\omega} < 1.0 \quad (1)$$

式中: σ_i, τ_i 分别为滑面上各滑动界面单元上的法向应力与切向应力。上标 $0, \omega$ 分别表示在 2 040 与 2 127.5 两水位下的值, 均由三维弹塑性有限元分析给出。由式(1)可联解出顺层滑面上的 c, ϕ 值的可能取值区间, 再由试验结果、滑面的物理力学特性及工程地质特点选定 c, ϕ 值, 见表 1。

表 1 有限元分析强度参数的试验及反算值

Table 1 Parameters in FEM analysis from test and back analysis

取值类型	顺层滑动带				切层滑动带				
	c / kPa		$\operatorname{tg} \phi$		c / kPa		$\operatorname{tg} \phi$		
	水上	水下	水上	水下	水上	水下	水上	水下	
试验值	48	46	0.397	0.38	15	10	0.898	0.795	
反算值	48	30	0.48	0.38					
计算取值	初值	48	40	0.397	0.38	15	10	0.898	0.795
	残余	28	10	0.32	0.25	15	10	0.898	0.795

3 滑体的滑动性态与滑速分析

3.1 泥化夹层的力学模型

考虑到滑带上土堆积体的变形模量 E 随应力水平而变化, 采用 Duncan-Zhang 模型模拟滑带土的非线性弹性关系, 滑面上部顺层滑移段的高粘粒含量的滑带土的室内试验显示了明显的残余变形, 选用椭圆型的二次封闭型屈服面模拟土体的弹塑性应力应变关系:

$$\frac{(\bar{\sigma}_n - d)^2}{a^2} + \frac{\bar{\sigma}_n^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}_n = \bar{\sigma} / g(\theta)$, θ 为洛德角; $g(\theta)$ 反映应力空间内 π 平面上的屈服面形状。 a, b, d 的几何意义如图 1 所示, 它们都是塑性体应变增量 $d\epsilon$ 的函数, 具体值可根据三轴压缩试验确定。

3.2 泥化夹层的数值模型

用普通的三维实体单元离散滑体, 用文献[2]提出的摩擦接触型的内界面单元模拟滑

面的相对大剪切变形与超限剪应力释放转移机理。这种特殊的夹层单元模型见图 2^[2]。

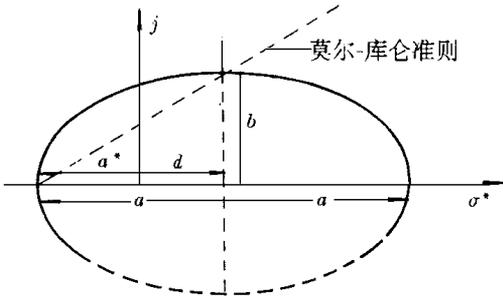


图 1 椭圆形的随应变(密度)而变化的屈服面

Fig 1 Yield surface varied with strain

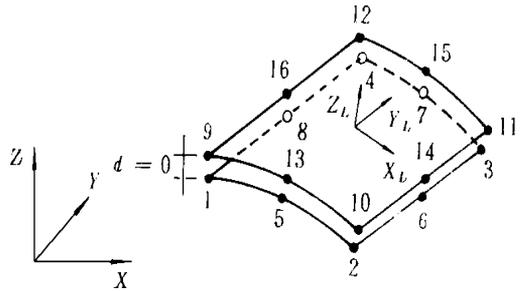


图 2 局部坐标系中的摩擦接触型内界面单元

Fig 2 Interface element model for simulation of sliding surface

在三维接触摩擦界面单元中, 接触条件可分成四类, 即固定、滑动、张开和混合型。对应于上述不同接触状态, 接触面上位移和应力应满足不同的平衡条件和连续条件。接触摩擦问题需经多次迭代才能获得正确解。计算时, 首先假设单元处于某种接触状态, 按照假定的状态, 分别计算等效单元刚度矩阵和等效荷载向量。解有限元方程后, 得到一组试验解。将试验解进行接触状态检查, 看其是否与原假设状态相同, 若不同则重新假定为新的接触状态, 并修改荷载向量, 进行新一轮迭代, 直至收敛。

3.3 渗透动水压力的考虑

首先根据滑体的初始渗透系数, 分析计算滑体的渗流场, 确定出各结点的水头势函数 ϕ 及水力坡降 J , 即可根据式(2)计算滑体各结点在水位上升或下降时不同的渗透体积力:

$$S = \gamma_w(1 - n)J \tag{3}$$

$$J = \text{grad}\Phi \tag{4}$$

各单元的渗透体积力将按单元形函数积分, 自动生成各单元的渗透等效结点荷载, 在有限元分析中加以考虑。

由奥地利引进的大型岩土工程分析软件 FNLAL 能够实现对以上岩土介质的各种本构模型与渗透压力等多种荷载的考虑。

3.4 有限元滑动性态分析结果

3.4.1 初始状态

在初始自重地应力作用下, 摩擦-接触的滑面被弹性锁定, 断面的岩土颗粒骨架的弹性变形总量约为 1~ 10 cm, 符合岩土介质的沉降规律与量级。滑体的应力为自重产生的压应力场。

3.4.2 水位上升阶段

(1) 从图 3 可见, 由于水位上升, 滑体介质中孔隙压力上升 ($\gamma_w \Delta H$), 介质颗粒间有效应力降低 [$(\gamma_s - \gamma_f) \Delta H$], 使滑体介质的骨架发生弹性回复变形, 故弹性增量位移矢量均

指向上。其中 γ_s, γ_f 分别为介质的湿容重与浮容重。

(2) 由于有效应力降低, 各应力增量大都为负值(拉应力), 其最大可达 0.4 MPa, 如图 4 所示。

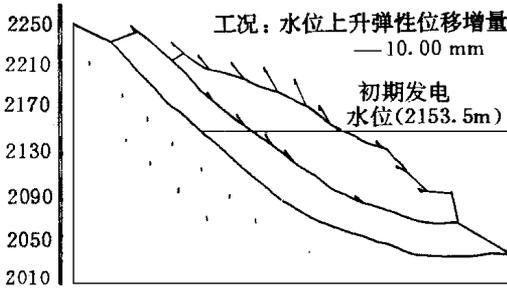


图 3 初期发电洪水水位纵 4 断面位移场

Fig 3 The displacements on No. 4 section under the water level for early power generation

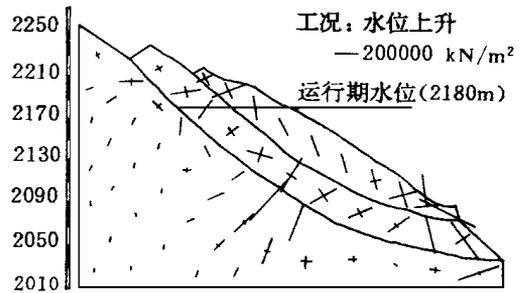


图 4 运行期水位纵 4 断面应力场

Fig 4 The stresses on No. 4 section under operation water level

(3) 水位上升时, 滑体的弹性回复变形量大致在自重作用下的弹性变形范围以内, 而水位上升使得滑体滑动产生的位移达到 5~ 50 cm, 见图 5。

(4) 根据有限元分析得出的应力场可直接求得滑体的安全系数, 如表 2。

表 2 主滑面三维有限元分析安全系数 (水位上升)

Table 2 The safety factors based on 3-D FEM under different water levels

断面	水 位 /m					
	2 040	2 127. 5	2 145	2 153	2 160	2 180
纵 1 断面	1. 11	1. 18	1. 10	1. 02	0. 97	0. 92
纵 4 断面	1. 14	1. 21	1. 12	1. 06	1. 02	0. 96
纵 9 断面	1. 08	1. 10	1. 01	0. 95	0. 90	0. 86
滑坡体整体	1. 07	1. 12	1. 05	0. 99	0. 94	0. 90

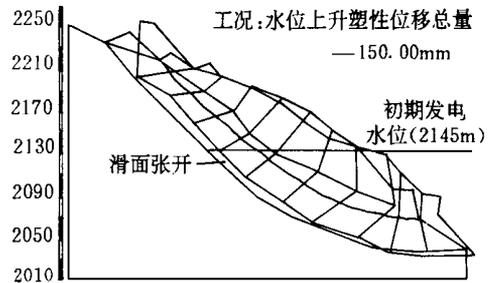


图 5 初期发电洪水水位纵 4 断面变形图

Fig 5 The deformed slope under the water level for early power generation

3.4.3 水位骤降阶段

(1) 位移特点: 由于水位骤降, 滑体中的渗透体积力向下作用, 同时滑面上的孔隙水压力还来不及消散, 滑面上抗剪强度处于最低值, 而渗透体积力荷载却处于最大值, 致使滑体沿滑面发生较大的滑动与变形。

(2) 应力特点: 滑动产生的大变形、大位移使应力场变得非常复杂。大致规律为滑坡体后缘普遍出现拉应力, 量值大约为 1 MPa; 滑坡体前缘普遍出现压应力集中现象, 量值大约为 2.0~ 2.5 MPa; 由于滑体的大位移产生的剪应力在滑床前部产生有规律的拉应力分布(图 6)。

(3) 变形分析: 从当前水位 2 127. 5 m 骤降到初始状态水位 2 040m 时, 80 多米水头的渗透体积力使滑体主滑面产生了较大的滑移量, 滑体本身也发生了大变形, 大部分滑面

张开, 滑体前缘部分被压缩发生畸变(图 7)。

(4) 安全系数: 表 3 给出水位从不同高度骤降时, 各纵剖面的安全系数。

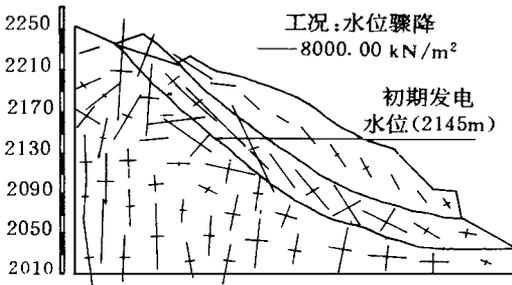


图 6 初期发电水位纵 4 断面应力场

Fig 6 The stresses of the slope under the water level for early power generation

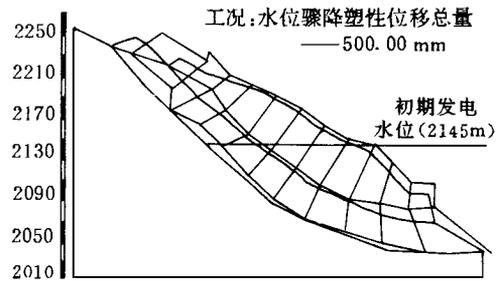


图 7 初期发电水位纵 4 断面变形图

Fig 7 The deformation of the slope under the water level for early power generation

表 3 主滑面三维有限元分析安全系数(水位骤降)

Table 3 The safety factors based on 3-D FEM under water suddenly falling

断面	(初始)	水位/m				
		2 040	2 127. 5	2 145	2 153. 5	2 160
纵 1 断面	1. 11	0. 91	0. 83	0. 74	0. 67	0. 63
纵 4 断面	1. 14	0. 86	0. 81	0. 77	0. 70	0. 63
纵 9 断面	1. 08	0. 94	0. 90	0. 87	0. 80	0. 77
滑坡体整体	1. 07	0. 85	0. 80	0. 75	0. 69	0. 64

本文采用的泥化夹层的非线性弹性、弹塑性本构模型、滑体的流固二相介质模型、滑动面的摩擦-接触大变形模型均在理论上把握住了本滑体的主要力学特性与变形特点, 较传统的条分法具有以下 3 个特点:

(1) 滑体自身的变形, 包括弹性变形、塑性变形、流变变形等, 在许多较完整的岩质边坡中可能并不显著, 忽略后不会引起较大的误差, 但在本滑体中, 滑体的层间泥化夹层厚度大、弹模小, 加之滑体自身的弹模也不大, 且风化、饱水, 使得整个滑体的变形较大, 宜在分析中加以考虑。由图(4), (5)可见, 大部分滑面张开且压应力在滑体前缘区高度集中, 如此的变形与滑动性状与条分法的假定相距甚远。

(2) 滑体特别是层间泥化夹层的渗透体积力对滑体的滑动机理、滑体介质内的孔隙水压力与颗粒之间的有效应力的相互消长, 相互作用等, 在条分法中是无法描述的。

(3) 滑动面上的压剪应力的增减变化过程、塑性屈服过程、加工硬化与应变软化过程等在条分法中也无法考虑。

3.5 滑坡体滑速分析

滑速的有限元分析涉及到三维动力大变形有限元问题, 本文所应用的岩土工程分析软

件系统 FNAL 在理论上可无困难地分析该动力大变形问题, 但受所需机时及时步长 ΔT 的限制, 本文采用了一种“拟静力”的分析方案。

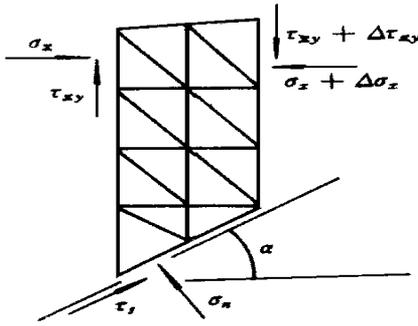


图 8 滑速计算模型

Fig 8 A analysis model of sliding velocity for the slope

将单宽滑体沿单元边界垂直分成条带状单元组 (图 8), 根据前节弹塑性迭代分析各迭代次的应力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 及各可发生大变形的摩擦 - 接触型界面单元上的法向、切向应力 σ_n, τ_t , 作为初始条件, 按牛顿第二定律计算各单元组 (条) 在各时步的不平衡力及各条组单元的运动加速度 a_x , 假定在一个时段内加速度为常量, 即可求得该时段末滑条单元组的速度, 以及当滑体单元组水平移位 ΔL 时所需要时间 ΔT 。下一时段各单元组已移动了一水平距离 ΔL , 即滑动到原来前一单元组的位置处, 计算 a_x 时该滑段的应力分量应改用新移到此位置的单元组的值。部分计算成果见表 4。

表 4 滑坡体滑速计算成果

Table 4 Sliding velocities of the slope

水位	$t_{\text{始}}/s$	$\alpha / m \cdot s^{-2}$	$u_{x \text{末}} / m \cdot s^{-1}$	$\Delta T / s$
2 127.5m	$t_0 = 0$	1.56	8.85	5.65
	$t_1 = 5.65$	0.54	10.27	2.61
	$t_2 = 8.27$	-0.33	9.43	2.54
	$t_3 = 10.80$	-1.44	4.12	2.54
	$t_4 = 14.48$	-2.05	0	
2 180m	$t_0 = 0$	1.93	9.82	5.09
	$t_1 = 5.09$	0.94	11.98	2.29
	$t_2 = 7.38$	-0.02	11.95	2.09
	$t_3 = 9.47$	-0.80	10.15	2.26
	$t_4 = 11.73$	-1.27	6.28	3.05
	$t_5 = 14.78$	-1.84	0	

由表 4 可见, 滑速的演变是一个变加速的过程, 在 5~6 s 内即由零变化到最大值。尽管在本文中, 将滑坡出口反弧段安全地以坡度为零考虑, 但由于存在着一段较长的切层滑移段, 滑坡体的速度均因为滑动过程中下滑力、抗滑力的消长变化而不断减小, 并且很快降为零, 一般在水平滑动 80~110m 即静止下来。从数值上来看, 滑体的最大滑速都不大, 一般在 10~12m/s。这主要是由于存在反弧段的缘故, 以及切层介质的抗剪强度持续增高, 同时, 较高的水位也对滑坡体迎水面产生了较大的阻力, 这一阻力随着滑速的增大而成平方地增大^[3], 因此也起到了一定的阻滑作用。

4 滑坡产生的涌浪分析^[3]

设想在库岸处长 L 的地段上发生滑坡, 其岸坡变形或滑速 U 已知, 全部过程历时为 T 。将整个滑坡过程视为每一小段 ΔL 在每一时段 Δt 中, 在库水中形成的一系列小扰动的组合, 对每个小扰动视为孤立波, 由孤立波的变形、传播和反射规律, 计算其初始浪高 $\Delta \xi$ 。并根据其传播路程(包括不断反射)计算其变化。将各个小波的影响迭加, 即可求得整个涌浪过程。在实际计算中假定: (1) 涌浪传播过程中忽略能量损耗, 或假定损耗已知; (2) 忽略边界条件非线性影响, 库岸为平行陡壁; (3) 每个小波成分为孤立波, 波速为常数; (4) 假定涌浪到达库岸后发生全反射, 或反射系数 K 已知; (5) 岸坡变形率或滑速 v 为常数, 本文计算中取上节所得滑速最大值; (6) 滑坡发生在 $0 < t < T$ 内, T 为滑坡总历时。涌浪高度的计算成果见表 5。

表 5 涌浪高度计算成果

Table 5 Calculation results of the height of water wave

水位/m	最大滑速 /m · s ⁻¹	历时/s	围堰处 涌浪/m	坝址处 涌浪/m
2 127.5	10.27	14.48	32.9	12.8
2 145	11.09	13.15	36.0	14.5
2 153.5	11.23	12.51	39.6	16.4
2 160	11.39	12.57	39.8	16.7
2 180	11.98	14.78	39.9	17.7

从表 5 可看出, 库水位越高, 各计算值也越大, 库水深度对涌浪高度影响比较明显。距滑坡较远的地方, 最大涌浪高度较小; 距离越大, 小得亦越多。且当滑体速度等其它因素一定时, 持续时间越长, 涌浪也越高。坝址处涌浪高一般在 12~ 18m 之间, 围堰处涌浪高在 32~ 40m 之间, 均可能造成翻堰、翻坝事故, 应引起重视。特别应该注意的是, 以上成果是指涌浪可向下游继续自由行进时的值, 若涌浪到达坝或围堰处受阻, 则将因反射而涌高。

5 结语

(1) 本文针对一实际工程问题, 首次应用三维弹塑性有限元方法研究了不同水位下滑体的滑动性态、滑速以及由此而产生的涌浪高度, 可望对分期安全蓄水提供科学依据。

(2) 数值分析中采用反演强度参数方法、土体的非线性应力应变模型、可模拟滑动面大变形的摩擦-接触型界面单元模型, 以及渗透水压力模型等, 均把握住了该滑坡体的主要力学特性与变形特点, 在理论上较传统的条分法更接近工程实际。

(3) 在滑速分析计算中, 首次采用有限元的方法考虑了滑体的几何特征、物理力学性质、扬压力以及滑动过程中受到的迎水面上动水阻力等主要因素, 故计算结果较为合理。

(4) 在滑坡引起的涌浪分析中, 对滑体的规模(前缘宽、厚度)、滑速、距离、水库岸坡几何特征、滑坡持续时间等因素均加以考虑, 分析结果在量级上是合理的。

(5) 虽然在水位超过当前水位 2 127.5m 时, 该滑体开始成为不稳定体, 但建坝后若逐步进行控制蓄水, 使水位分阶段缓慢上升, 则可使滑体逐步缓慢地滑入库中, 而不致引起太高的涌浪。

参 考 文 献

- 1 Gudhus 等 岩土力学中的有限单元法 张清, 张弥译 北京: 铁道出版社, 1984
- 2 雷晓燕, 李宁 三维摩擦-接触单元的新模型 华东交通大学学报, 1993, (1): 1~ 5
- 3 潘家铮 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 北京: 水利出版社, 1980
- 4 李宁, 尹森菁 漫湾边坡监测资料仿真反分析 岩石力学与工程学报, 1996, 14(1): 9~ 18

A 3-D FEM ANALYSIS ON SLIPPING BEHAVIOR OF THE SLOPE IN LIJIAIXIA POWER STATION

L i N i n g H a n X u a n C h e n F e i x i o n g

(X i a n U n i v e r s i t y o f T e c h n o l o g y , X i a n 7 1 0 0 4 8)

Abstract Based on the geological condition and mechanical property of II[#] slope in Lijiaxia power station, the c , φ values of the slipping surface are back determined with the macro-stability of the slope. The effect of dynamic seepage pressure is simulated with non-linear elastic and elasto-plastic model. The slipping behavior, slipping velocity, and water wave are evaluated with 3-D FEM. This can be provided as a scientific basement for the safety and efficiency of the project.

Key words Lijiaxia, slipping mass, slope slipping, seepage pressure, slipping velocity, water wave

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》是今年最后一期学报, 将发表下列内容的文章:

- (1) 岩石断口与节理特性;
- (2) 岩层移动模型与杆体可伸长锚杆;
- (3) 盐岩的流变特性及混凝土中应力变化与波幅射的关系;
- (4) 软化柱形扩张问题与断层泥破坏特征;
- (5) 大桥锚碇现场模型试验与爆破工程问题;
- (6) 浆液渗流与沉桩环境问题;

此外, 还有讨论文章与全年学报的分类目录和总目录。