

大岗山高拱坝坝肩刚体弹簧元抗滑稳定分析

殷荣岗^{1,2}, 张建海^{1,2}, 刘喜康^{1,2}

(1. 四川大学 水力学及山区河流开发与保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为研究大岗山高拱坝的坝肩抗滑稳定性, 采用刚体弹簧元法对大岗山高拱坝坝肩滑块稳定性展开研究, 并与刚体极限平衡法成果进行对比。计算结果表明, 水推力是影响滑块稳定性的主要因素, 摩擦系数较凝聚力对滑块的稳定性影响更为显著, 相比刚体极限平衡法, 二者滑块抗滑稳定安全系数规律一致, 刚体弹簧元计算考虑了坝体与地基的相互作用和坝基的地质特征, 结果更为合理。

关键词: 大岗山高拱坝; 刚体弹簧元法; 坝肩滑块; 稳定系数

中图分类号: TV642.4⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)03—0121—05

Stability Analyses of Dagangshan High Arch Dam's Abutment by Using Rigid Body Spring Element Method

YIN Rong-gang^{1,2}, ZHANG Jian-hai^{1,2}, LIU Xi-kang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Development and Protection, Sichuan University,

Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: In order to study the stability of the Dagangshan arch dam's abutment, a rigid body spring element method is used here, and compared with the rigid body limit equilibrium method. The results show that the hydraulic thrust plays a dominant role for affecting the stability of slip bodies. Comparing the friction coefficient with cohesion force, the stability of slip bodies is more sensitive to the friction coefficient, and the behavior of the safety factor is consistent with the result obtained by the limit equilibrium method. In the calculation with the rigid body spring element method, the interaction of the dam body and foundation is taken into account, and the geological characteristics of the dam foundation are modeled in detail, so the result from rigid body spring element method is more reasonable.

Keywords: Dagangshan high arch dam; rigid body spring element method; abutment slip body; coefficient of stability

1 工程地质概况

大岗山高拱坝^[1-2]坝址位于四川省大渡河中游上段雅安市石棉县挖角乡境内, 电站装机容量 2 600 MW(4×650 MW)。水库正常蓄水位 1 130.00 m, 库容约 $7.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 调节库容 $1.17 \times 10^8 \text{ m}^3$, 多年平均年径流量为 $318.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。电站枢纽主要由拦河混凝土双曲拱坝、泄洪消能建筑物、引水发电建筑物等组成, 最大坝高为 210.00 m。

如图 1 所示, 大岗山左右岸坝肩及抗力体地形

较完整, 山体较雄厚, 谷坡陡峻。左岸岸坡走向约 NE26°, 右岸岸坡走向约 NE26°~36°。左岸下游发育有 1#、2# 两条浅沟, 1# 沟位于坝下游 190 m, 沿 $\beta_8(F_7)$ 发育, 切割深度一般 40 m~60 m; 2# 沟位于坝下游 400 m, 沿 $\beta_4(F_5)$ 发育, 切割深度一般 30 m~50 m。左坝肩及抗力体范围内主要有 F_{33} 、 F_{54} 、 F_{67} 、 F_4 、 F_{17} 、 F_{35} 、 F_{36} 、 F_{145} 等断层和 $\beta_8(F_7)$ 、 $\beta_{112}(F_{32})$ 、 $\beta_{118}(F_{19})$ 、 $\beta_{41}(F_{46})$ 、 β_{21} 、 β_{28} 等辉绿岩脉破碎带切割。右坝肩及抗力体范围内有 F_6 、 F_7 、 F_5 、 F_{12} 、 F_{14} 、 F_{16} 、 F_{37} 、 F_{231} 等断层和 β_8 、 β_4 等辉绿岩脉切割。

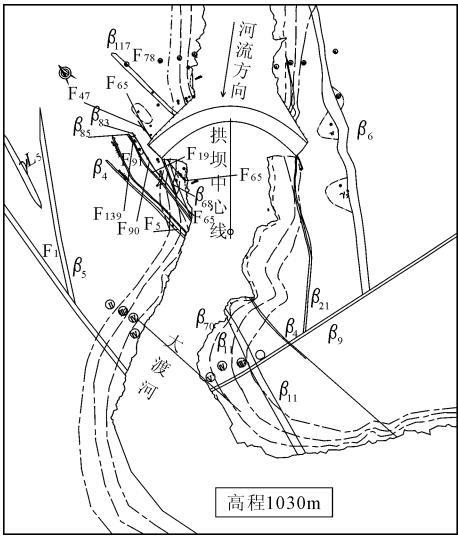


图 1 大岗山 1 030 m 高程平切图

2 计算原理

本文采用刚体弹簧元法^[3-5]进行计算研究。刚体弹簧元模型^[6](RBSM: Rigid Body - Spring Model)的基本思想是:把结构划分为一些由分布在接触面上的弹簧系统连接在一起的刚性单元的集合^[7]。计算软件采用由四川大学水电学院岩土教研室研制开发的三维刚体弹簧元数值分析软件 NASGEWIN 计算。

2.1 滑动面及滑动方向的判定

设滑动体所受合力为 $\vec{r}$, 滑动体上某个面的内法向为 $\vec{n}$ 。则若合力向该面投影后, 该面上为压应力, 即:

$$r_n = \vec{r} \cdot \vec{n} \leq 0 \quad (1)$$

则该面参与滑动体的抗滑。按照参与抗滑的滑动面数目 N_R , 可以将滑动类型划分为:

$$N_R = \begin{cases} 1 & \text{单滑 (一面压紧)} \\ 2 & \text{双滑 (二面压紧)} \\ 3 & \text{超稳 (三面压紧)} \end{cases}$$

(1) 单面滑动的滑动方向

块体可能沿着单面滑动, 如图 2 所示。此时, 初始滑动方向与合力 $\vec{r}$ 在滑动面 P_1 上的正投影方向平行。用 $\vec{n}_1$ 表示滑动面的法向, $\vec{r}$ 在平面 P_1 与 $\vec{r}$ 和 $\vec{n}_1$ 构成的平面的交线上的投影, 即为单面滑动的滑动方向 $\vec{s}$:(图 3):

$$\vec{s} \parallel (\vec{n}_1 \times \vec{r}) \times \vec{n}_1 \quad (2)$$

式中: $\parallel$ 表示“具有同一方向”。

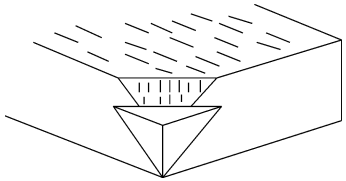


图 2 单面滑动

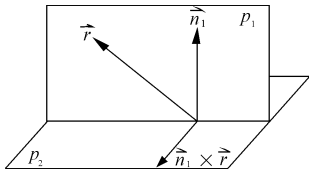


图 3 单面滑动的滑动方向

(2) 双面滑动的滑动方向

如果块体沿两个不平行的面同时滑动(图 4), 则滑动方向与它们的交线平行。假定 $\vec{n}_1$ 和 $\vec{n}_2$ 分别为平面 P_1 和 P_2 的法向量, 滑动方向与 $(\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)$ 方向相同或相反。实际的滑动方向与 $\vec{r}$ 在 $(\vec{n}_1 \times \vec{n}_2)$ 方向上的投影的方向相同。如果函数 f 为正, 令函数 $\text{sign}(f)$ 为 $+1$; f 为负, 令 $\text{sign}(f)$ 为 -1 ; f 为零则 $\text{sign}(f) = 0$ 。双面滑动的滑动方向为 $\vec{s}$ (图 5):

$$\vec{s} \parallel \text{sign}[(\vec{n}_1 \times \vec{n}_2) \cdot \vec{r}](\vec{n}_1 \times \vec{n}_2) \quad (3)$$

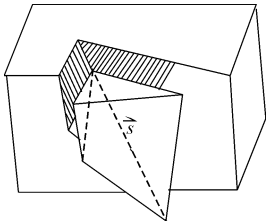


图 4 双面滑动

2.2 总阻滑力与块体所受合力的计算

(1) 总阻滑力的计算

在刚体弹簧元分析中可以直接给出交界面上的面力, 故而可方便地求得总的阻滑力。即:

$$F_Z = \int_{a_c} [c + (\sigma_n - p)f] da \quad (4)$$

其中: c 为凝聚力; σ_n 为滑面上作用的正应力(以压为正); p 为渗压; $f = \tan \varphi$ 为摩擦系数; a_c 为参与抗滑的滑动面上的单元交界面, 若 a_c 被拉坏或剪坏, 则不计入积分。

刚体极限平衡法中, 只要某滑动面参与抗滑, 则整个滑面的面积均计入抗滑力计算。而在刚体弹簧元法中, 滑动面被分割为若干个子面, 而且仅当子面未出现拉坏和剪切破坏时, 才计入该面的抗滑力。可见, 刚体弹簧元法考虑了拱坝推力在抗力体中的传递和抗滑面上的局部受力特征, 因而更符合实际

工程情况。

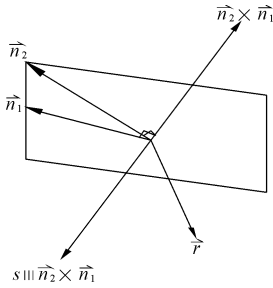


图 5 双面滑动的滑动方向

(2) 块体所受的合力的计算

由刚体弹簧元分析所得交界面上的面力,可以积分得到块体所受合力。合力 $\vec{r}$ 为:

$$\begin{aligned}\vec{r} &= \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n \left(\int_{a_c} \vec{t} da \right) = \sum_{i=1}^n \left(\int_{a_c} \sigma \vec{n} da \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\int_{a_c} Q^T R da \right)\end{aligned}\tag{5}$$

其中: $\vec{F}_i$ 为第*i*个刚体弹簧元交界面上的合力; $\vec{t}$ 为刚体弹簧元交界面上的应力; Q 为局部坐标系与整体坐标系之间的坐标变换矩阵; R 为刚体弹簧元交界面上的正应力与剪应力, $R = \{\sigma_n, \tau_s, \tau_t\}$,详见图 6。

总滑动力等于合力在滑动方向上的投影:

$$F_H = \vec{r} \times \vec{s}\tag{6}$$

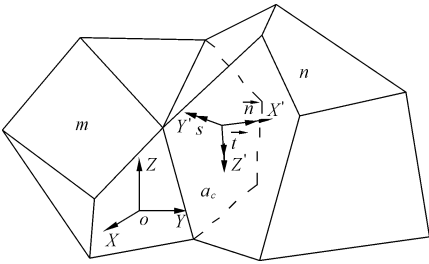


图 6 单元界面及局部坐标示意图

2.3 滑动面抗滑稳定安全系数

滑动体的整体抗滑安全系数^[8-9]定义为总阻滑力和总滑动力之比,即:

$$K_s = \frac{F_Z}{F_H}\tag{7}$$

上式的计算和刚体极限平衡法一致,便于计算结果

的相互对比。

3 研究方案

3.1 计算范围及结构离散

大岗山高拱坝三维刚体弹簧元^[10]分析计算范围取为:*X*方向由右岸指向左岸,拱坝中心线两侧各取 600.0 m,即横河向截取 1 200.0 m。*Y*方向由下游指向上游,拱坝轴线上游侧取 300.0 m,顺河向截取总长度 1 400.0 m。铅直向底部取至 600.0 m 高程,顶部延伸至坝顶 1 135 m 高程。为能充分模拟地形地质特征和坝肩大垫座等结构,本次网格划分采用了 34 个平切面,三维计算模型共计剖分节点 14 833,刚体单元 15 675。

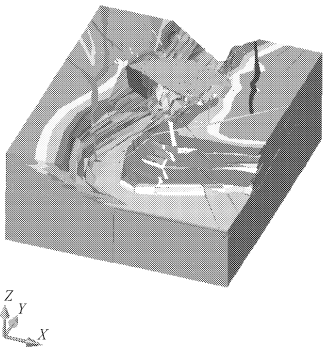


图 7 刚体弹簧元计算模型

3.2 计算工况及物理力学参数

本次刚体弹簧元计算采用由分析所得的左岸 6 个和右岸 6 个滑移块体组合,并且分别计算了各个滑块在 13 个工况下的安全系数。在此,着重介绍左岸 L2、L6 和右岸 R1、R2 滑块在表 1 所示的 5 种工况下的安全系数,并对此进行了总结分析。

3.2.1 坝肩抗滑稳定分析工况

参见表 1,工况 1 至工况 5 用于研究不同荷载组合情况下坝肩稳定性,其荷载组合如下:工况 1:自重 + 正常蓄水位 + 泥沙 + 温降 + 帷幕排水正常;工况 2:自重 + 正常蓄水 + 淤沙(不计渗压,不计温降荷载);工况 3:渗压 + 滑块自重,工况 4:工况 1 + 摩擦系数 *f*' 值单独下浮 10%;工况 5:工况 1 + 凝聚力 *c*' 值单独下浮 10%。

表 1 大岗山坝肩静力稳定计算工况与荷载组合表

工况	参数取值	坝体自重	上游水位/m	下游水位/m	帷幕排水(渗压)	坝体变温
1	基本参数	✓	1130.0	955.0	正常	设计温降
2	基本参数	✓	1130.0	955.0	—	—
3	基本参数	✓	—	—	正常	—
4	剪摩 <i>f</i> ' 值单独下浮 10%	✓	1130.0	955.0	正常	设计温降
5	凝聚力 <i>c</i> ' 值单独下浮 10%	✓	1130.0	955.0	正常	设计温降

3.2.2 各类岩层物理力学参数选用

(1) 坝体混凝土力学参数

混凝土密度:2.4 t/m³,弹性模量:24.0 GPa,泊松比:0.17,线膨胀系数:1.0×10⁻⁵/℃。

(2) 基岩材料

大岗山高拱坝基岩材料物理力学参数见表 2。

3.2.3 典型块体选取

限于篇幅,本文重点对表 3 所示的 4 个控制滑块进行稳定分析。图 8(a~d)分别给出了左岸 L2, L6 和右岸 R1, R2 的三维立体图。典型块体组合及

其物理力学参数如表 3 所示。

表 2 大岗山高拱坝基岩材料参数

岩类	E_h/GPa	E_v/GPa	μ	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	c'/MPa	f'	f
Ⅱ	21.50	18.50	0.25	2.65	2.00	1.30	0.90
Ⅲ ₁	10.00	7.00	0.27	2.62	1.50	1.20	0.75
Ⅲ ₂	7.50	5.00	0.30	2.62	1.00	1.00	0.65
Ⅳ	3.00	1.25	0.35	2.58	0.70	0.80	0.60
V ₁	0.35	0.25	0.38	2.45	0.20	0.50	0.40
V ₂	0.20	0.20	0.40	2.10	0.18	0.40	0.35

表 3 块体组合及物理力学参数

岸别	块体编号	底滑面 出露 高程/m	侧滑面		底滑面		下游陡面	
			结构面	计算采用产状 及 c' 和 f'	结构面	计算采用产状 及 c' 和 f'	结构面	计算采用产状 及 c' 和 f'
左岸 控制 滑块	L2	950	β_{28}	N20°E/NW∠70° $c' = 0.03, f' = 0.40$	F_{54}	N20°E/NW∠11° $c' = 0.10, f' = 0.50$	裂隙④	N80°W/NE∠70° $c' = 0.10, f' = 0.60$
	L6(局部滑块)	950	F_{99}	N71°E/SE∠87° $c' = 0.05, f' = 0.35$	F_{54}	N20°E/NW∠11° $c' = 0.10, f' = 0.50$		
右岸 控制 滑块	R1	960	β_4	N24°W/SW∠68° $c' = 0.05, f' = 0.35$	裂隙⑥	N5°E/SE∠20° $c' = 0.08, f' = 0.50$	裂隙⑥	N20°E/SE∠17° $c' = 0.08, f' = 0.50$
	R2	1060	F_{231}	SN/NE∠40° $c' = 0.08, f' = 0.50$	裂隙⑥	N20°E/SE∠17° $c' = 0.08, f' = 0.50$		

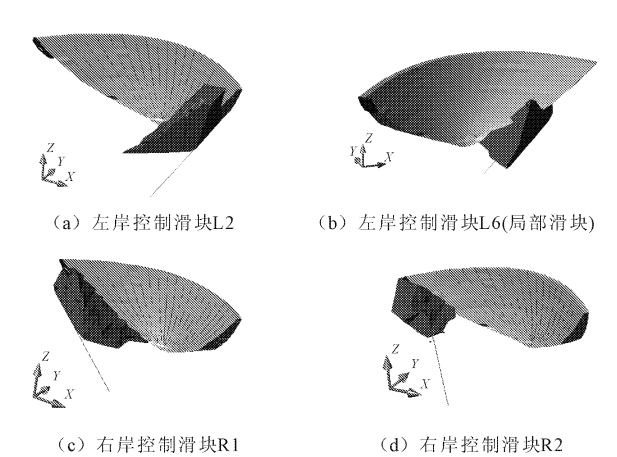


图 8 典型滑块的三维示意图

3.3 计算过程及步骤如下:

- (1) 将坝体单元置空,计算基岩在自重荷载作用下的应力场分布,并将该应力场作为初始应力场,而初始位移场则置为零。
- (2) 计算在坝体自重荷载作用下,基岩及坝体整体的应力场及位移场,并将应力场与初始应力场叠加,所得应力场作为本步的最终应力场。
- (3) 根据前面的工况描述,施加各工况对应的水荷载、温度荷载、泥沙荷载以及相应的材料参数,计算相应的位移场及应力场,并与上部计算所得的

应力场及位移场叠加作为最终的位移场与应力场。
(4) 最后由各工况下的应力场与位移场计算各个滑块的安全系数。

4 计算成果及分析

表 4 给出了三维刚体弹簧元计算所得左岸控制滑块体 L2, L6 和右岸控制滑块体 R1, R2 在工况 1 至工况 5 的稳定安全系数。图 9 给出了各工况下控制滑块的安全系数。为便于对比分析,同时给出了刚体极限平衡法分析所得滑块安全系数的计算成果,见表 5。

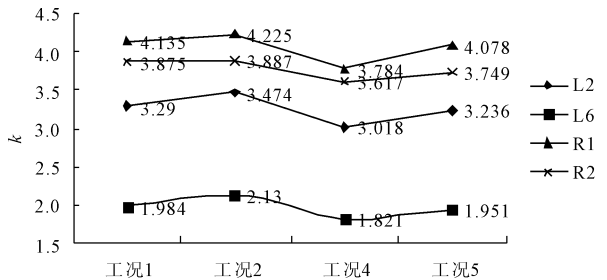


图 9 各工况下控制滑块稳定安全系数

- (1) 在工况 1(自重 + 正常蓄水 + 温降 + 帷幕正常)的情况下,由刚体弹簧元法与由刚体极限平衡法计算所得的 L2 和 L6 滑块的抗滑稳定安全系数分

别为 3.290,3.830 和 1.984,2.250。可见,这两种方法计算所得的滑块抗滑稳定安全系数基本接近。右岸也有相同的规律性。

表 4 控制块体稳定安全系数统计表(刚体弹簧元法)

编号	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
L2	3.290	3.474	15.071	3.018	3.236
L6(局部滑块)	1.984	2.130	2.995	1.821	1.951
R1	4.135	4.225	4.479	3.784	4.078
R2	3.875	3.887	5.484	3.617	3.749

表 5 成果对比自重 + 正常蓄水 + 温降 + 帷幕正常

编号	刚体弹簧元法	刚体极限平衡法
L2	3.290	3.830
L6(局部滑块)	1.984	2.250
R1	4.135	5.520
R2	3.875	3.330

(2) 不计温降和渗压的工况 2 中,从表 4 可以看出,温降和渗压对滑块的稳定性有明显的影响,这是由于温降和渗流减小了正应力,导致滑块的抗滑力较小,降低了安全系数。但降温 and 渗压对右岸影响较小。

(3) 不计入水推力作用的工况 3,L2 滑块安全系数可达 15.071,比工况 1 的 3.290 大幅增加;L6 滑块在工况 3 的抗滑稳定安全系数是 2.995,比工况 1 的 1.984 增大了 51.1%。可见,水推力是影响滑块稳定性的主要因素。右岸也有相同的结果。

(4) 摩擦系数对抗滑安全系数影响显著。L2 的侧滑面、底滑面和下游切出面的摩擦系数分别为 0.4,0.5 和 0.6。由表 4 可见,摩擦系数 f' 下降 10%(工况 4),将使 L2 的抗滑稳定安全系数由 3.290 降低为 3.018,降低 8.27%;L6 的侧滑面、底滑面的摩擦系数分别为 0.35 和 0.5。由表 4 可见,摩擦系数 f' 下降 10%(工况 4),将使 L6 的抗滑稳定安全系数由 1.984 降低为 1.821,降低 8.21%。右岸的数据也说明摩擦系数对滑块的稳定安全系数影响显著。

(5) L2 的侧滑面、底滑面和下游切出面凝聚力分别为 0.03 MPa,0.10 MPa 和 0.10 MPa,由表 4 可见,凝聚力 c' 下降 10%(工况 5),将使 L2 的抗滑稳定安全系数由 3.290 降低为 3.236,L6 的侧滑面、底滑面和下游切出面凝聚力分别为 0.05 MPa,0.10 MPa 和 0.10 MPa,由表 4 可见,凝聚力 c' 下降 10%(工况 5),将使 L6 的抗滑稳定安全系数由 1.984 降低为 1.951,减小量很小。可见,相比于摩擦系数,凝聚力对抗滑稳定安全系数的影响较小,主要原因是

凝聚力的量值较小。右岸的结果也说明了这一点。

5 结 论

本文采用刚体弹簧元法对大岗山高拱坝坝肩左右岸滑块在 5 种不同工况下的抗滑稳定安全系数进行计算,并对计算结果讨论分析,得到以下几点结论:

(1) 从刚体弹簧元法计算所得控制滑块稳定安全系数看,水推力对坝肩稳定性影响最为显著。渗压和温降对左右岸滑动块体的抗滑稳定安全系数影响范围约 0.3% ~ 7.4%。

(2) 摩擦系数下降 10%,左右岸滑块抗滑稳定安全系数下降范围为 6.65% ~ 8.49%。由于凝聚力的量值相对较小,其参数升降对坝肩的稳定性影响较小。

(3) 刚体极限平衡法中,只要某滑动面参与抗滑,则整个滑面的面积均计入抗滑力计算。而在刚体弹簧元法中,滑动面被分割为若干个子面,而且仅当子面未出现拉坏和剪切破坏时,才计入该面的抗滑力。可见,刚体弹簧元法考虑了拱坝推力在抗力体中的传递和抗滑面上的局部受力特征,因而更符合实际工程情况。

参考文献:

[1] 潘家铮,何 璟.中国大坝 50 年[M].北京:中国水利电力出版社,2000:370-413.

[2] 李 瓚,陈 飞,郑建波,等.特高拱坝枢纽分析与重点问题研究[M].北京:中国电力出版社,2004:804-815.

[3] 张建海,范景伟,何江达.用刚体弹簧元法求解边坡、坝基动力安全系数[J].岩土力学与工程学报,1999,18(4):387-391.

[4] 张建海,范景伟,胡 定.刚体弹簧元理论及应用[M].成都:成都科技大学出版社,1999:91-98.

[5] 柴军瑞.高拱坝坝肩岩体动力稳定性分析综述[J].辽宁工程技术大学学报,2001,20(4):502-504.

[6] 张学言.岩土塑性力学[M].北京:人民交通出版社,1993:112-120.

[7] 潘别桐,黄润秋.工程地质数值法[M].北京:地质出版社,1994:24-40.

[8] Zhang J H, He J D, Fan J W. Static and dynamic stability assessment of rock slopes and dam foundations using rigid body - spring element method[J]. Int. J. Rock Mechs & Mining Scis, 2001,38(8):1081-1090.

[9] 蔡 新,郭兴文.拱坝整体非线性稳定分析[J].河海大学学报,1999,27(2):74-80.

[10] 张建海,何江达.小湾高拱坝三维有限元弹塑性分析[J].云南水力发电,2000,16(1):61-64.