

# 岩石边坡动力稳定安全系数的块体单元法分析

郑惠峰<sup>1,2</sup>, 汪卫明<sup>1</sup>, 陈胜宏<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国水电工程顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 将动力分析的块体单元法应用于岩石边坡地震稳定时程分析。将黏弹性人工边界条件的思想与块体单元理论相结合, 建立块体系统的人工边界条件, 用以模拟地基的弹性恢复能力和地基对散射波能量的吸收, 从而消除波动在计算区域边界上的反射。黏弹性边界具有稳定性好, 易于与计算程序结合的优点。通过动力计算所得的块体加速度计算块体的惯性力, 并由此判断块体可能的滑动模式, 进而根据滑动模式将惯性力分解为块体滑动力和垂直于滑动方向的作用力, 由此作用力计算块体的抗滑力。块体抗滑稳定安全系数即为抗滑力与滑动力之比, 从而可以得到地震过程中块体稳定安全系数时程曲线。小湾水电站进水口边坡算例体现了该方法的工程应用能力。

**关键词:** 岩石力学; 块体单元法; 动力稳定; 黏弹性边界; 安全系数; 岩石边坡

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)增1 - 2785 - 08

## ANALYSIS OF DYNAMIC FACTOR OF SAFETY OF ROCK SLOPE WITH BLOCK ELEMENT METHOD

ZHENG Huifeng<sup>1,2</sup>, WANG Weiming<sup>1</sup>, CHEN Shenghong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072,

China; 2. East China Investigation and Design Institution, China Hydropower Engineering Consulting Group Co.,

Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

**Abstract:** Block element method(BEM) for dynamic analysis is developed and applied to historical analysis of seismic stability of rock slope. Combining the idea of viscoelastic boundary with the theory of BEM, the artificial boundary condition of BEM is formulated, which can eliminate the reflection of the seismic waves on the boundaries of the computational domain. Viscoelastic boundary has the merits of numerical stability and convenience to integrate with computational program. The inertial force of rock block is firstly computed by its acceleration obtained by dynamic analysis, then is decomposed according to supposed sliding mode into sliding force and force perpendicular to the supposed sliding direction, which is used for calculating resistance force. The factor of safety against sliding is defined by the ratio of the resistance force to the sliding force. When the seismic process finishes, the time-history curve of factor of safety against sliding of rock block can be obtained. The application of the intake slope of Xiaowan Hydropower Station demonstrates the capacity of this method.

**Key words:** rock mechanics; block element method; dynamic stability; viscoelastic boundary; factor of safety; rock slope

**收稿日期:** 2006 - 10 - 16; **修回日期:** 2006 - 12 - 16

**基金项目:** 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2004C009)

**作者简介:** 郑惠峰(1981 - ), 男, 博士, 2002年毕业于武汉大学水力发电工程专业, 主要从事水工及岩土工程结构动力稳定分析方面的研究工作。E-mail: zheng\_hf@ecidi.com

## 1 引言

随着国家西部大开发战略的逐步实施和国家电力能源结构调整的需要,水电能源开发布局进一步向西南和西北的高山峡谷转移,工程规模进一步加大,如小湾、溪洛渡、锦屏等拱坝高达 300 m,形成前所未有的坝肩岩石高边坡。这些地区复杂的地质构造和较高的地震烈度使得坝肩岩体的抗震稳定成为工程的关键问题之一。

边坡岩体抗震稳定分析的复杂性,不仅在于它涉及地震工程、岩土工程和结构工程等多个研究领域,还在于它难以进行室内的振动模拟试验。目前岩石边坡块体动力稳定分析方法主要有刚体极限平衡法、有限元法、离散元法、界面元法、不连续变形分析、块体单元法、数值流形方法和复合单元法等。

刚体极限平衡方法<sup>[1~4]</sup>因为工程经验丰富,安全标准符合实际,仍为边坡块体稳定分析的主要方法。但是目前用刚体极限平衡法进行抗震分析依然是一种拟静力方法,难以体现地震作用下岩块的动力放大效应。

有限元法由于具有成熟的理论体系而成为目前岩体工程中应用最为广泛的数值方法。将有限元法与刚体极限平衡法相结合,利用有限元法静动力分析所得的块体表面应力应用于刚体极限平衡法,计算块体稳定安全系数,从而得到整个地震过程中块体的安全系数曲线<sup>[5~6]</sup>。其特点在于充分利用两种方法的优点,且所得安全系数与现行规范一致。但是,受制于有限元法前处理能力,只能根据经验判断选取几条重要的不连续面纳入计算模型,因而所形成的块体数量有限,可能导致关键块体被遗漏。离散元法<sup>[7~9]</sup>、界面元法<sup>[10、11]</sup>和不连续变形分析<sup>[12、13]</sup>等方法均属于不连续介质力学方法。应用不连续介质力学方法来分析岩体沿薄弱面失稳是目前研究方向之一,但是这些方法在理论上还不是很成熟,应用于岩石边坡动力稳定分析还有待进一步的研究或改进。数值流形方法<sup>[14~16]</sup>和复合单元法<sup>[17~20]</sup>同时具有连续和不连续介质力学方法的特征,目前在工程中的应用尚处于初步阶段。

块体单元法<sup>[21]</sup>属于不连续介质力学方法范畴,适用于被大量不连续面切割的岩体。本文将动力分析的块体单元法发展并应用于岩石边坡地震稳定的

时程分析。文中引入黏弹性人工边界,建立块体系统的人工边界条件,模拟地基无限域的影响,保证地震波能量能够从计算区域内部穿过而不发生发射。在每个动力计算时步,由块体加速度计算其惯性力,然后根据块体滑动方向分解为抗滑力和滑动力,其比值即为此一时步抗震稳定安全系数。由此可以得到整个地震作用过程中块体的稳定安全系数时程曲线。

## 2 动力分析的块体单元法

在常规块体单元法的基础上,采用集中质量矩阵和 Rayleigh 阻尼矩阵,建立运动状态下块体单元在惯性力、阻尼力、动力荷载和弹性恢复力作用下的动力平衡方程<sup>[22]</sup>:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

式中:  $[M]$ ,  $[C]$  和  $[K]$  分别为块体系统的总质量矩阵、总阻尼矩阵和总刚度矩阵;  $\{\ddot{U}\}$ ,  $\{\dot{U}\}$  和  $\{U\}$  分别为块体单元加速度、速度和位移;  $\{P(t)\}$  为与时间有关的动力荷载。

地震时,由于地面加速度  $\{a\}$  的存在,运动方程变为如下形式:

$$[M]\{\ddot{U}_r\} + [C]\{\dot{U}_r\} + [K]\{U_r\} = -[M]\{a\} \quad (2)$$

式中:  $\{\ddot{U}_r\}$  为结构相对于地面的加速度。

方程的求解可采用 Wilson- $\theta$  法,即假定时段  $\Delta t$  中的加速度按线性变化,进行逐步积分求解。计算步长取为实际步长的  $\theta$  倍 ( $1.4 < \theta < 2.7$ )。

## 3 黏弹性边界

### 3.1 黏弹性边界的基本原理

黏弹性边界是利用无限域介质本构方程和来自计算域内部的外行波建立的一种应力边界条件。由于其具有稳定、易于编程的特点,受到学术和工程界的重视,成为近期国内外局部人工边界的研究重点之一。黏弹性边界的研究最早始于黏性边界<sup>[23]</sup>,之后则是运用均匀介质线弹性介质中的柱面波或球面波作为单侧外行波建立黏弹性边界条件<sup>[24~26]</sup>,由于考虑了波在介质中的几何扩散衰减,进而考虑了介质的刚性恢复作用,因此提高了模拟精度。黏弹性边界的物理意义相当于在边界节点每个方向上施加一个一端固定的单向弹簧-阻尼元件,以黏性阻

尼的吸能作用和弹簧的刚性恢复作用模拟无限域的影响。

根据三维黏弹性人工边界的一般形式, 边界上一点  $l$  在  $i$  方向的应力  $\sigma_{li}$  为

$$\sigma_{li} = -K_{li}u_{li}(t) - C_{li}\dot{u}_{li}(t) \quad (3)$$

式中:  $u_{li}(t)$ ,  $\dot{u}_{li}(t)$  分别为点  $l$  在  $i$  方向的位移和速度;  $K_{li}$ ,  $C_{li}$  分别为点  $l$  在  $i$  方向的弹簧刚度系数和黏滞阻尼系数, 其表达式分别为

$$K_{li} = \frac{\lambda + 2G}{r}, \quad C_{li} = \rho c_p \quad (\text{法向}) \quad (4)$$

$$K_{li} = \frac{G}{r}, \quad C_{li} = \rho c_s \quad (\text{切向}) \quad (5)$$

式中:  $\lambda$ ,  $G$  均为介质的 Lamé 常数;  $c_p$ ,  $c_s$  分别为纵波和横波波速;  $\rho$  为介质密度;  $r$  为点  $l$  在极坐标中的半径, 极坐标原点位于波源处。由式(3)可以看出, 边界点  $l$  的应力是其位移和速度的函数。

考虑到平面波由相同的平面无衰减波和平面衰减波构成, 同时存在多子波混合入射, 可将上述人工边界表达式加以推广和修正<sup>[27]</sup>:

$$K_{li} = \frac{\lambda + 2G}{r} \frac{1}{A+1}, \quad C_{li} = B\rho c_p \quad (\text{法向}) \quad (6)$$

$$K_{li} = \frac{G}{r} \frac{1}{A+1}, \quad C_{li} = B\rho c_s \quad (\text{切向}) \quad (7)$$

式中:  $A$ ,  $B$  分别为刚度调节系数和阻尼调节系数。数值试验表明, 在均匀弹性介质条件下,  $A$ ,  $B$  的最优取值为:  $A$  取 0.8 左右;  $B$  取 1.1 左右。另外, 在实际计算中, 为简化黏弹性边界, 取结构几何中心到某一边界面的垂直距离统一代替该边界面各点的  $r$  值。

### 3.2 块体单元法中黏弹性人工边界的建立

基于前述黏弹性人工边界的思想, 在块体系统边界面上施加弹簧 - 阻尼元件(图 1)来模拟波动在块体边界上的效应。对于边界面  $j$  相邻的块体单元  $rl$  的运动方程可写为

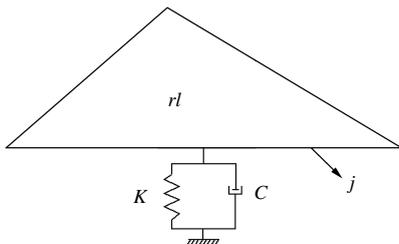


图 1 块体单元黏弹性边界物理意义示意图

Fig.1 Sketch of physical meaning of viscoelastic boundary on block element

$$[m]_{rl}\{\ddot{U}\}_{rl} + [c]_{rlrl}\{\dot{U}\}_{rl} + \sum_{rm} [c]_{rlrm}\{\dot{U}\}_{rm} + [k]_{rlrl}\{U\}_{rl} + \sum_{rm} [k]_{rlrm}\{U\}_{rm} = \{p(t)\}_{rl} + \{F\}_{rl} \quad (8)$$

式中:  $\{F\}_{rl}$  为对黏弹性边界面  $j$  上的应力  $\{\sigma\}_j$  积分所得到的作用在边界块体单元  $rl$  上的荷载, 可表示为

$$\{F\}_{rl} = -\sum_j J(j) \iint [P]_j \{\sigma\}_j dx_j dy_j \quad (9)$$

由黏弹性边界条件原理可得

$$\{\sigma\}_j = -[K]_j \{\delta\}_j - [C]_j \{\dot{\delta}\}_j \quad (10)$$

其中,

$$[K]_j = \begin{bmatrix} K_{sj} & 0 & 0 \\ 0 & K_{sj} & 0 \\ 0 & 0 & K_{nj} \end{bmatrix} \quad [C]_j = \begin{bmatrix} C_{sj} & 0 & 0 \\ 0 & C_{sj} & 0 \\ 0 & 0 & C_{nj} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $[K]_j$ ,  $[C]_j$  分别为边界面  $j$  的弹簧刚度系数和黏弹性系数矩阵;  $K_{nj}$  为法向弹性刚度系数,

$K_{nj} = \frac{\lambda + 2G}{r_j} \frac{1}{A+1}$ ;  $K_{sj}$  为切向弹性刚度系数,  $K_{sj} =$

$\frac{G}{r_j} \frac{1}{A+1}$ ;  $C_{nj}$  为法向黏滞阻尼系数,  $C_{nj} = B\rho c_p$ ;  $C_{sj}$

为切向黏滞阻尼系数,  $C_{sj} = B\rho c_s$ ;  $\{\delta\}_j$  为边界面  $j$  积分点的应变;  $\{\dot{\delta}\}_j$  为边界面  $j$  积分点的应变率。

若块体单元  $rl$  与边界面  $j$  相邻, 则有

$$\left. \begin{aligned} \{\delta\}_j &= J(j)[L]_j[M]_j\{U\}_{rl} \\ \{\dot{\delta}\}_j &= J(j)[L]_j[M]_j\{\dot{U}\}_{rl} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(9)~(11)代入式(8)可得

$$[m]_{rl}\{\ddot{U}\}_{rl} + ([c]_{rlrl} + [C]_{rl})\{\dot{U}\}_{rl} + \sum_{rm} [c]_{rlrm}\{\dot{U}\}_{rm} + ([k]_{rlrl} + [K]_{rl})\{U\}_{rl} + \sum_{rm} [k]_{rlrm}\{U\}_{rm} = \{p(t)\}_{rl} \quad (13)$$

其中,

$$[K]_{rl} = \sum_j \iint [M]_{rl}^T [L]_j^T [K]_j [L]_j [M]_{rl} dx_j dy_j$$

$$[C]_{rl} = \sum_j \iint [M]_{rl}^T [L]_j^T [C]_j [L]_j [M]_{rl} dx_j dy_j$$

由式(12)可以看出, 块体单元法引入黏弹性边界在运动方程上仅改变总刚度矩阵、总阻尼矩阵中边界块体单元所对应的对角线数值, 并未形成单独的边界条件, 因而在方程的求解时并不存在自身的稳定问题。

### 3.3 块体单元法中黏弹性边界的精度

考虑一悬臂梁(图 2), 在其自由端作用有与狄拉克函数的有限差分近似的脉冲集中力  $F(t)$ (见图 3)。采用块体单元法分别计算了梁右端为固定约束、黏弹性边界以及将右端固定约束面延伸至 200 m 处时  $x=0.25$  m 的点 A 的振动位移, 并与解析解相比较。介质弹性模量  $E=80$  MPa, 泊松比  $\mu=0.25$ , 密度  $\rho=2\ 000$  kg/m<sup>3</sup>, 作用时间  $T=1.0$  s。

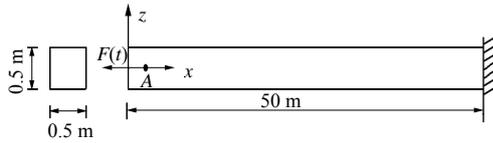


图 2 悬臂梁示意图

Fig.2 Sketch of cantilever

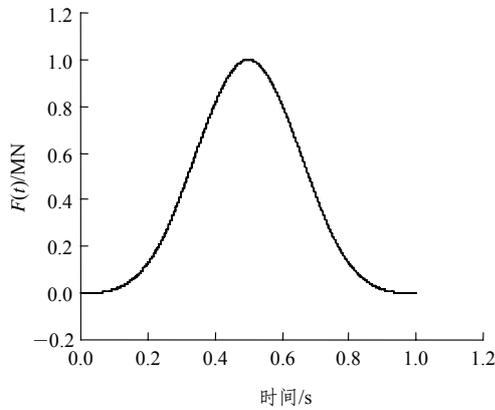


图 3 脉冲作用时程曲线

Fig.3 Time-history curve of impulse action

问题的解析解为 Lamb 问题的弹性动力学解答<sup>[28]</sup>:

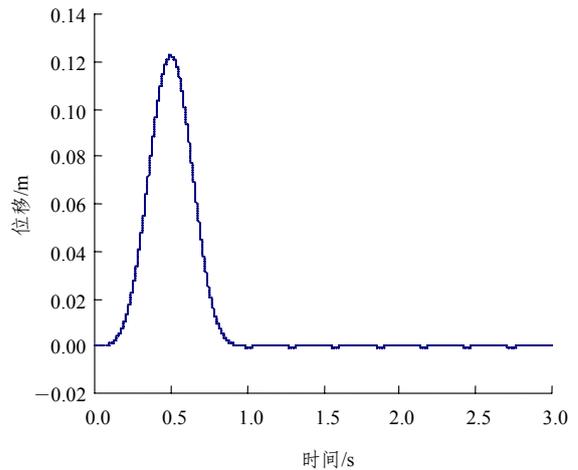
$$u(x) = \begin{cases} 0 & (\tau < c_s/c_p) \\ \frac{F}{2\pi Gx} \left[ \frac{1}{4(1-c_s^2/c_p^2)} + \sum_{i=1}^2 \frac{K_i(1-2v_i^2)^2(c_s^2/c_p^2 - v_i^2)^{1/2}}{\tau^2 - v_i^2} + \frac{K_3(1-2v_3^2)^2(v_3^2 - c_s^2/c_p^2)^{1/2}}{v_3^2 - \tau^2} \right] & (c_s/c_p \leq \tau \leq 1) \\ \frac{F}{\pi Gx} \left[ \frac{1}{4(1-c_s^2/c_p^2)} + \frac{K_3(1-2v_3^2)^2(v_3^2 - c_s^2/c_p^2)^{1/2}}{v_3^2 - \tau^2} H(v_3 - \tau) \right] & (\tau > 1) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $G$  为剪切模量,  $G=E/[2(1+\mu)]$ ;  $c_s$ ,  $c_p$  分别为剪切波波速和膨胀波波速,  $c_p=(E/\rho)^{1/2}$ ,  $c_s/c_p=1/\sqrt{3}$ ;  $F$  为集中力函数,  $F=F(t)$ ;  $x$  为待求点与集中力作用点距离;  $\tau$  为量纲一的量,  $\tau=(c_s t)/x$ ;  $v_1^2 = \frac{1}{4}$ ,  $v_2^2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4}$ ;  $v_3^2 = \frac{3+\sqrt{3}}{4}$ ;  $K_i = \frac{1}{16(1-c_s^2/c_p^2)(v_i^2 - v_j^2)(v_i^2 - v_k^2)}$  ( $i, j, k=1, 2, 3$ ;  $i \neq j \neq k$ );  $H(t)$  为 Heaviside 函数。

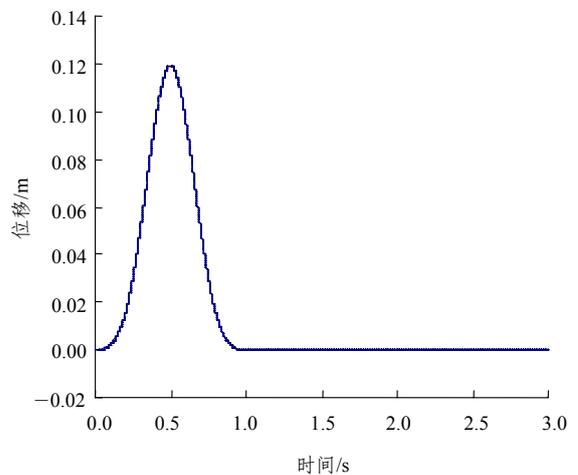
图 4 给出了各种计算条件下点 A 的位移时程。比较图 4(a)和(b)可看出, 文中所提的块体单元法的黏弹性边界条件具有较好的精度。图 4(c)和(d)都显示了固定边界对于波的反射的影响, 而且可以看出 200 m 长梁反射的延迟。

### 4 块体动力稳定安全系数

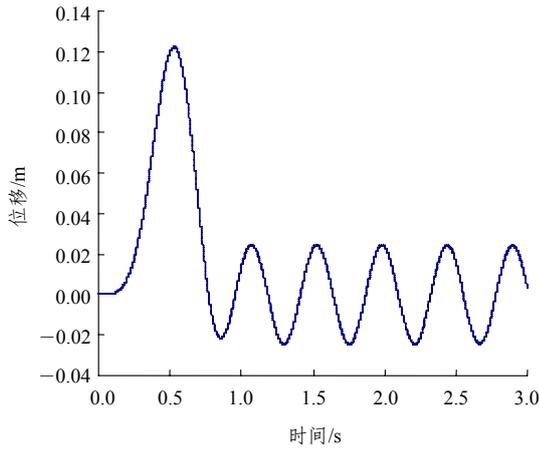
对于岩石边坡中可能失稳的块体, 常见的破坏模式有 3 种, 即无滑动面的自由脱落、单面滑动和



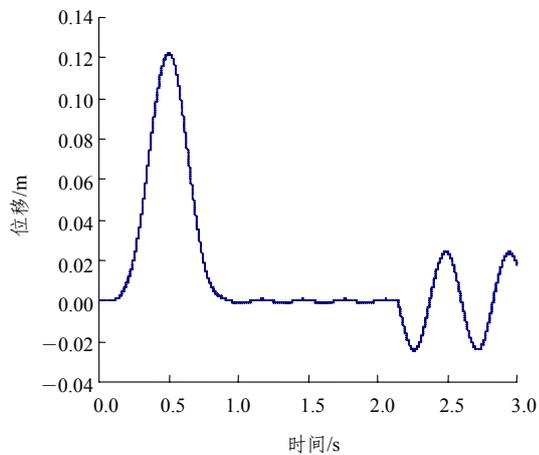
(a) 黏弹性边界



(b) 解析解



(c) 固定边界



(d) 200 m 长梁固定边界

图 4 点 A 的位移时程曲线

Fig.4 Time-history curves of displacement of point A

双面滑动。地震过程中, 在每一计算时刻, 由块体单元法动力计算可得到各块体单元的加速度, 由此可计算块体的惯性力。若记  $t$  时刻块体单元  $rl$  的惯性力为  $\vec{F}_{rl, t}$ , 则可首先判断块体可能的破坏模式<sup>[29]</sup>。对于无滑动面自由脱落的块体, 其安全系数为 0。单面滑动的情况下, 将  $\vec{F}_{rl, t}$  沿滑动面  $j$  进行分解, 滑动面  $j$  上作用的法向力为

$$\vec{T}_{rl, t} = (\vec{F}_{rl, t} \cdot \vec{n}_j) \vec{n}_j \quad (15)$$

式中:  $\vec{n}_j$  为滑动面  $j$  法线方向单位矢量。滑动力是合力在滑动面  $j$  上的正交投影, 等于合力减去法向力:

$$\vec{S}_{rl, t} = \vec{F}_{rl, t} - \vec{T}_{rl, t} \quad (16)$$

则  $t$  时刻块体抗滑安全系数为

$$\bar{S}_{rl, t} = (|\vec{T}_{rl, t}| f_j + c_j A_j) / |\vec{S}_{rl, t}| \quad (17)$$

式中:  $f_j$ ,  $c_j$  和  $A_j$  分别为滑动面  $j$  的摩擦因数、黏聚力和面积。

若块体经判断为双面滑动(图 5), 设滑动面为  $j$  和  $k$ , 则其交线方向为

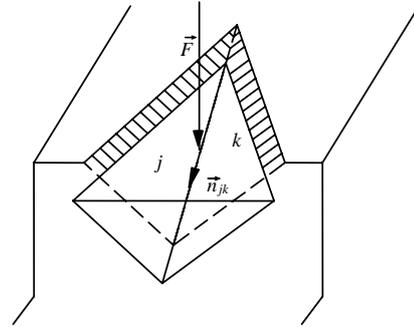


图 5 双面滑动示意图

Fig.5 Sketch of two-sides sliding

$$\vec{n}_{jk} = \frac{\vec{n}_j \times \vec{n}_k}{|\vec{n}_j \times \vec{n}_k|} \text{sgn}[\vec{F}_{rl, t} \cdot (\vec{n}_j \times \vec{n}_k)] \quad (18)$$

假定块体沿两滑面的交线滑动, 于是滑动力为

$$\vec{S}_{rl, t} = (\vec{F}_{rl, t} \cdot \vec{n}_{jk}) \vec{n}_{jk} \quad (19)$$

根据力的合成法则, 投影到两法线所在的平面的力为

$$\vec{T}_{rl, t} = \vec{F}_{rl, t} - \vec{S}_{rl, t} \quad (20)$$

再向两平面法向分解得  $\vec{T}_j$  和  $\vec{T}_k$ , 由正弦定理得

$$\left. \begin{aligned} |\vec{T}_k| &= |\vec{T}_{rl, t}| \frac{\sin(\vec{T}_{rl, t}, \vec{n}_k)}{\sin(\vec{n}_j, \vec{n}_k)} \\ |\vec{T}_j| &= |\vec{T}_{rl, t}| \frac{\sin(\vec{T}_{rl, t}, \vec{n}_j)}{\sin(\vec{n}_j, \vec{n}_k)} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

于是, 抗滑稳定安全系数为

$$K_{rl, t} = (|\vec{T}_j| f_j + c_j A_j + |\vec{T}_k| f_k + c_k A_k) / |\vec{S}_{rl, t}| \quad (22)$$

## 5 算例

作为本文方法的工程应用, 将其应用于小湾水电站进水口边坡块体地震稳定性分析。小湾水电站为双曲拱坝, 坝高 292 m。电站进水口边坡陡立(见图 6), 有  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_5$  和  $f_6$  等四级断层和多组节理发育, 彼此切割形成可能滑动的块体(见图 7), 对边坡稳定极为不利。在图 6 和 7 中显示了由断层  $f_3$ ,  $f_6$  和节理 J 所围成的一个块体。动力计算时, 边坡岩体容重取为  $27 \text{ kN/m}^3$ , 不连续面力学参数是由静态参数换算所得的动态参数, 列于表 1。

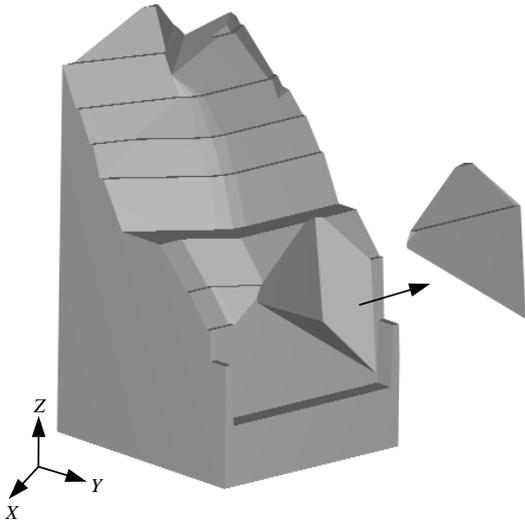


图 6 小湾水电站进水口边坡及块体位置

Fig.6 Intake slope of Xiaowan Hydropower Station and position of block

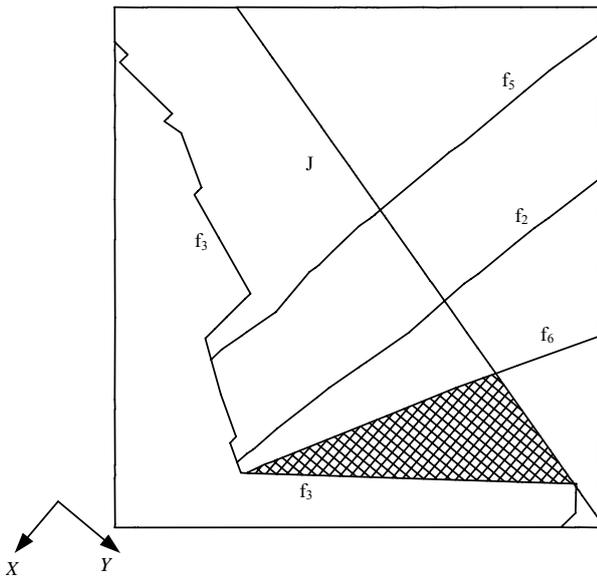


图 7 进水口结构面位置

Fig.7 Position of discontinuities of intake slope

表 1 不连续面力学参数

Table 1 Mechanical parameters of discontinuities

不连续面	黏聚力 $c$ /MPa	摩擦因数 $f$	切向刚度 $K_s$ /(MPa · m <sup>-1</sup> )	法向刚度 $K_n$ /(MPa · m <sup>-1</sup> )
$f_2, f_3, f_5, f_6$	0.040	0.50	4 000	10 000
J	0.125	0.80	6 000	15 000

计算中输入图 8 所示的地震加速度，地震作用方向为沿 X 轴方向，持续时间为 10 s，计算工况为自重及地震作用。图 9 给出了计算所得的块体(图 6, 7)的抗震稳定安全系数时程曲线。计算中输入图 8

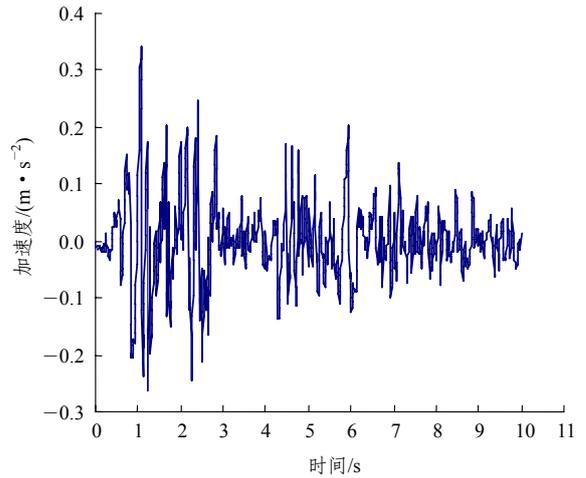


图 8 输入地震加速度时程曲线

Fig.8 Time-history curve of input seismic acceleration

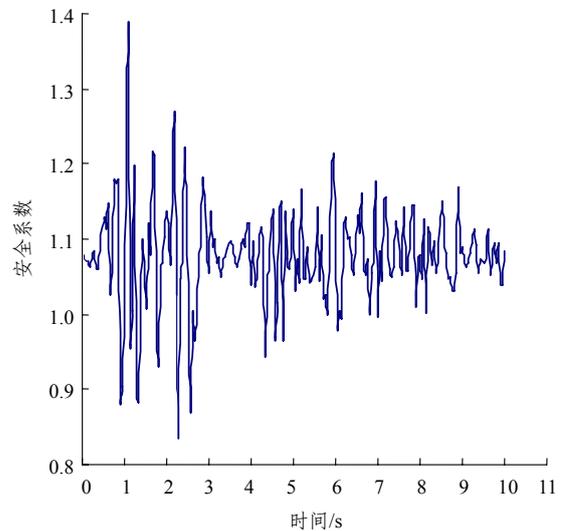


图 9 块体动力稳定安全系数时程曲线

Fig.9 Time-history curve of factor of safety of block dynamic stability

所示的地震加速度，地震作用方向为沿 X 轴方向，持续时间为 10 s，计算工况为自重及地震作用。图 9 给出了计算所得的块体(图 6, 7)的抗震稳定安全系数时程曲线。

## 6 结 论

本文首先将黏弹性人工边界的思想与块体单元法相结合，建立了块体单元法的黏弹性人工边界条件，以消除地震波能量在计算区域边界上的反射。然后由块体在每一时刻的惯性力按其滑动模式分解所得的抗滑力和滑动力之比确定对于地震过程中边坡岩石块体的抗滑稳定安全系数，从而得到块体地

震过程稳定安全系数时程曲线。小湾水电站进水口边坡算例表明了本文方法的实际工程应用能力。

本文仅提供了抗滑稳定安全系数的时程曲线。由于动力稳定问题的复杂性, 在某一瞬时稳定系数小于 1 并不意味着块体系统的失稳, 故合理的稳定安全系数取值问题值得进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.(PAN Jiazheng. Stability against sliding of buildings and analysis of landslide[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980.(in Chinese))
- [2] 王毓泰, 周维垣, 毛健全, 等. 拱坝坝肩块体稳定分析[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1982.(WANG Shutai, ZHOU Weiyuan, MAO Jianquan, et al. Stability analysis for block on arch dam abutment[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1982.(in Chinese))
- [3] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(GT9): 971 - 986.
- [4] LAM L, FREDLUND D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(4): 905 - 919.
- [5] 张伯艳, 陈厚群, 杜修力, 等. 拱坝坝肩抗震稳定分析[J]. 水利学报, 2000, (11): 55 - 59.(ZHANG Boyan, CHEN Houqun, DU Xiuli, et al. Arch dam abutment aseismatic stability analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 55 - 59.(in Chinese))
- [6] 张伯艳, 陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 665 - 670.(ZHANG Boyan, CHEN Houqun. Analysis of abutment aseismatic stability by using finite element and rigid body limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 665 - 670.(in Chinese))
- [7] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky system[C]// Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. Nancy, France: [s.n.], 1971: 11 - 18.
- [8] 王泳嘉, 刑纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.(WANG Yongjia, XING Jibo. Distinct element method and its application to geotechnical engineering[M]. Shenyang: Northeast Institute of Technology Press, 1991.(in Chinese))
- [9] ZHANG C, PEKAU O A, JIN F, et al. Application of distinct element method in dynamic analysis of high rock slopes and blocky structures[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 1997, 16(6): 385 - 394.
- [10] KAWAI T. A new discrete model for analysis of soil mechanics problem[J]. Seisan KenKyn, 1977, 29(4): 208 - 210.
- [11] 方义琳, 卓家寿, 章青. 具有任意形状单元离散模型的界面元法[J]. 工程力学, 1998, 15(2): 27 - 37.(FANG Yilin, ZHUO Jiashou, ZHANG Qing. Interface stress element method for distinct model with elements of arbitrary shape[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(2): 27 - 37.(in Chinese))
- [12] Shi G H. Block system modeling by discontinuous deformation analysis[M]. Southampton, UK: Computational Mechanics Publications, 1993.
- [13] 王如路, 陈乃明, 刘宝琛. 三维块体不连续变形分析理论简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 219 - 224.(WANG Rulu, CHEN Naiming, LIU Baochen. Study on the theory of three-dimensional block discontinuous deformation analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 219 - 224.(in Chinese))
- [14] 石根华. 数值流形方法与非连续变形分析[M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.(SHI Genhua. Manifold method and discontinuous deformation analysis[M]. Translates by PEI Juemin. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.(in Chinese))
- [15] 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 流形元法及其在工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 211 - 218.(ZHOU Weiyan, YANG Ruoqiong, YAN Gongrui. Manifold method and its application to engineering problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 211 - 218.(in Chinese))
- [16] 张国新, 王光纶, 裴觉民. 基于流形方法的结构体破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 281 - 287.(ZHANG Guoxin, WANG Guanglun, PEI Juemin. Structural failure analysis based on manifold method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 281 - 287.(in Chinese))
- [17] 陈胜宏, 强晟, 陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1 - 8.(CHEN Shenghong, QIANG Sheng, CHEN Shangfa. Study on the three-dimensional composite element model of bolted rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [18] CHEN S H, XU Q, HU J. Composite element method for seepage analysis of geotechnical structures with drainage hole array[J].

- Journal of Hydrodynamics(Series B), 2004, 16(3): 260 - 266.
- [19] CHEN S H, QIANG S. Composite element model for discontinuous rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 865 - 870.
- [20] 强 晟, 陈胜宏. 不连续岩体的三维弹黏塑性复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 390 - 3 396.(QIANG Sheng, CHEN Shenghong. Three-dimensional elasto-viscoplastic composite element model of discontinuous rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 390 - 3 396.(in Chinese))
- [21] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(CHEN Shenghong. Stability analysis of complicated rock foundation of high dam and rock high slope[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [22] 郑惠峰, 汪卫明, 陈胜宏. 块体单元法动力分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 608 - 613.(ZHENG Huifeng, WANG Weiming, CHEN Shenghong. Study on block element method for dynamic analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 608 - 613.(in Chinese))
- [23] LYSMER J, KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1969, 95(4): 859 - 877.
- [24] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1994, 120(1): 25 - 42.
- [25] 刘晶波, 吕彦东. 结构 - 地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55 - 64.(LIU Jingbo, LU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55 - 64.(in Chinese))
- [26] 杜修力. 局部解耦的时域波分析方法[J]. 世界地震工程, 2000, 16(3): 22 - 26.(DU Xiuli. A partially decoupling analytical method for wave propagation problems in time domain[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2000, 16(3): 22 - 26.(in Chinese))
- [27] 赵 密. 黏弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究[硕士学位论文][D]. 北京: 北京工业大学, 2004.(ZHAO Mi. Study on viscoelastic artificial boundary and its comparison with transmitting artificial boundary[M. S. Thesis][D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004.(in Chinese))
- [28] 艾龙根, 舒胡毕. 弹性动力学, 第二卷: 线性理论[M]. 戈 革译. 北京: 石油工业出版社, 1984.(ERINGEN A C, SUHUBI E S. Elastic dynamic mechanics, 2nd volume: linear theory[M]. Translated by GE Ge. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.(in Chinese))
- [29] 徐明毅, 汪卫明, 陈胜宏. 岩石边坡的危险滑动块体组合研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 148 - 151.(XU Mingyi, WANG Weiming, CHEN Shenghong. Research on the dangerous sliding-block combination of rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2): 148 - 151.(in Chinese))