

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3545-09

基于结构面抗剪强度演化的块体动力稳定性分析

徐栋栋¹, 邬爱清², 卢波², 郑宏¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.长江科学院/水利部岩土力学重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 传统块体理论仅针对块体的静力稳定性分析, 而未涉及到动力稳定分析。因此, 借用 Newmark 法累积滑移量的概念, 基于块体理论对定位块体在地震历时作用下的动力稳定性进行了研究, 提出了以块体累积滑动位移和动安全系数两个指标共同评价块体动力稳定性。提出一种接触面识别及面积计算算法, 它考虑了接触面积变化对块体稳定的不利影响, 也可用于块体滑动的大变形分析, 考虑了块体滑动过程中结构面抗剪强度的演化, 可对复杂的凸形块体及凹形块体进行静、动力稳定性分析。将其应用于三峡升船机乘船箱左侧边坡的块体稳定分析中, 结果显示块体在强震作用下发生了一段距离的滑动, 但震后仍可保持稳定。

关 键 词: 块体理论; 地震荷载; 动安全系数; 累积滑动位移; 剪应变; 接触面识别

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Dynamic stability analysis of located block based on shear strength evolution of structural plane

XU Dong-dong¹, WU Ai-qing², LU Bo², ZHENG Hong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The traditional block theory is just used to analyze the static stability of the block, while not concerned with the dynamic stability analysis. Based on block theory, the located block's dynamic stability under the action of earthquake is studied by utilizing the concept of accumulated slippage of Newmark method. Several important results are obtained. ① By using accumulated sliding displacement and dynamic safety factor commonly to evaluate dynamic stability of the block. ② A contact area identification and area computation algorithm, considering the adverse influence on the block stability caused by the variation of contact area and can do large displacement analysis during block's sliding. ③ The shear strength evolution of structural plane is considered during the earthquake. ④ It can be used to do static-dynamic analysis to the complicated convex and concave blocks. At last it is applied to analyze the stability of the left slope of shiplift boat box in Three Gorges Project. The results show that the block slides for a distance in the process of the severe earthquake, but it still keeps stable after the earthquake.

Key words: block theory; earthquake load; dynamic safety factor; accumulated sliding displacement; shear strain; contact area identification

1 引 言

裂隙岩体中, 因结构面切割形成的块体问题常常是构成岩体工程开挖稳定性评价及支护处理的主要问题, 在岩体工程(包括边坡与洞室等)方案论证及支护设计中占据重要位置。关于块体稳定性分析, 很多学者做了研究。大概分为两类: 第 1 类为仅考虑静荷载作用。Hoek^[1]假定单个楔形体沿着两

个不连续面的交线滑动, 给出了安全系数计算方法; 王思敬等^[2]将块体稳定分析考虑为非共点问题, 引入等效力学原理和虚功稳定性原理, 采用位置矢量分析方法, 求解了四面体块体在各种不同失稳方式下的稳定系数; 张菊明等^[3]将岩体所受荷载视为三维非共点力系, 针对由两组结构面控制的四面体块体, 提出将摩阻力功与约束面内的滑动所做功之比作为安全系数。第 2 类为考虑了动荷载作用。刘汉

收稿日期: 2011-10-27

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (No. 50925933)。

第一作者简介: 徐栋栋, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事计算岩土力学方面的研究工作。E-mail: xdhappy717@163.com

东^[4]结合 Newmark 法和传统刚体极限平衡分析法, 计算了在地震历时作用下岩体边坡楔形体的安全系数和永久位移, 为岩体边坡动、静稳定性评价提供了一条新的途径; 陶丽娜等^[5]讨论了在动力作用下楔形体的稳定性, 给出了在竖向和两个互相垂直的水平向的地震作用下的动安全系数计算公式, 并给出了在 x 方向地震波作用下, 楔形体的动安全系数的历时变化曲线; 王思敬等^[6]采用动力学方法, 对岩质边坡中的楔形块体在地震等动荷载作用下动力学过程进行了初步研究, 推导了一组相应的动力平衡公式, 并计算了楔形体的滑动位移。综上所述可以看出, 关于块体的稳定性分析主要是针对四面体楔形体等简单形状条件下的分析, 对复杂形状块体则只能采用简化方式处理。

石根华^[7]、Goodman 等^[8]提出的块体理论, 是对岩体块体稳定性分析方法的重大突破。自提出以来, 国内外很多学者对其进行了改进与应用: ①理论改进, 如陈斗勇等^[9]加入了块体转动, 张子新等^[10]提出了分形块体理论, Mauldon 等^[11]加入了初始地应力; ②块体形态改进^[12-17], 可确定复杂的多面体以及凹面体形态。③与概率方法结合, Mito 等^[18]提出随机块体理论, 在揭露不连续面之前, 预测形成可动块体的可能性; Hatzor 等^[19]利用裂隙交叉概率来确定临界可动块体。④与数值软件结合: Hatzor 等^[20]将块体理论与有限差分软件 Flac 结合, 利用前者进行稳定分析, 后者作应力分析。⑤工程应用: 在岩质边坡、坝基以及地下厂房等方面已有许多工程应用^[21-26]。如今基于块体理论的岩体块体稳定性分析方法已趋于成熟, 并逐步成为裂隙岩体稳定性分析中的重要方法。

从上述研究进展可知, 静力分析方面, 块体理论已经克服了以往算法只针对四面体等简单形状块体的不足。然而, 块体理论在动力稳定分析方面研究甚少。为了将块体理论在静力分析表现出的这种优势扩大至动力稳定分析方面, 本文基于块体理论研究了定位块体在地震作用下的动力稳定性。首先, 它弥补了块体理论在动力稳定分析方面的不足; 其次, 块体形态方面是基于文献^[12]的研究, 可对复杂凸形及凹形块体进行静、动力稳定分析。同时给出一种接触面识别及面积计算方法, 可考虑接触面积变化引起的总黏聚力贡献减小对块体稳定的影响。

2 计算流程

利用块体理论对定位块体在地震荷载作用下的

动力稳定性进行分析, 并提出用累积滑动位移和动安全系数两个稳定性评价指标共同评价块体稳定性。

2.1 计算步骤及流程图

块体的动安全系数及累积滑动位移计算流程如图 1 所示。计算步骤如下:

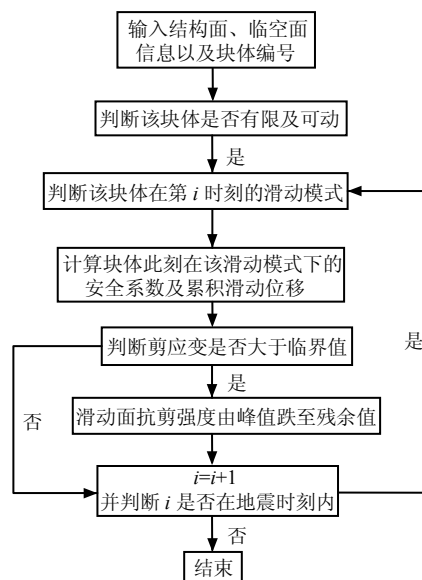


图 1 块体动安全系数及累积滑动位移计算流程图
Fig.1 Flow chart of the computation of dynamic safety factor and accumulated sliding displacement

(1) 判断块体在 i 时刻地震荷载与重力共同作用下的滑动模式, 滑动模式判断可参照文献^[27]。

(2) 计算此刻该滑动模式下的安全系数以及累积滑动位移, 具体计算可参照 2.3 节。

(3) 判断此刻剪应变是否大于临界值, 若是, 考虑结构面抗剪强度演化, $i = i + 1$, 返回步骤 (1) 继续循环; 否则, $i = i + 1$, 返回步骤 (1) 继续循环。此步中使用了块体形态可视化程序^[28], 以便于获得计算黏聚力时所需的块体体积以及结构面面积等相关信息; 结构面强度如何演化以及累积滑动位移计算假定稍后介绍。

(4) 地震结束, 循环结束。

关于累积滑动位移的计算, 借用了 Newmark 法^[29]累积滑移量的概念, 认为某一时刻块体静止, 而块体加速度反向时, 块体仍然保持静止状态, 即块体的滑动力小于黏聚力与摩擦力组成的抗滑力时, 根据加速度计算方法可知, 此时的加速度将会与滑动方向相反, 但实际上块体是不动的。地震过程中, 块体滑动模式有可能会发生改变, 这样计算相当复杂, 因此, 对其进行简化。将仅有自重作用

时的滑动方向视为最危险滑动方向，在该方向的倾向方向上施加 x 与 y 方向的合水平地震荷载，竖向地震荷载照常加到自重方向，保证块体在地震过程中一直沿着最危险方向滑动。如图 2 所示，在仅有自重作用时，若块体沿着 i 、 j 面的交线滑动，则将水平方向地震力合力施加到交线的倾向方向上即可；若块体沿着单面 i 的 \hat{s} 方向滑动，则将其加到 \hat{s} 的倾向方向即可。

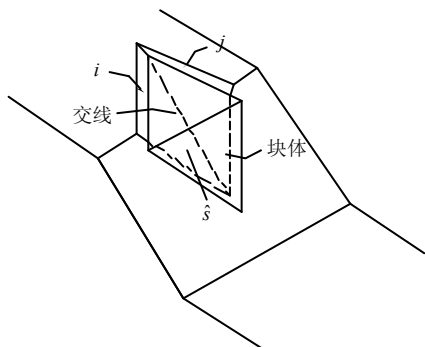


图 2 滑动块体示意图
Fig.2 Schematic diagram of sliding block

假定当剪应变大于某一临界值时，结构面抗剪强度，即黏聚力与摩擦系数均由峰值跌至残余值；临界值的选择以及强度损失的比例由试验曲线给定。此处剪应变定义为，剪切位移与沿着剪切方向的基线长度的比值。所谓基线，对于双面滑动，指的是两滑动面交线；对于单面滑动，指得是通过滑动面的某一个顶点，由滑动方向矢量与滑动面法线矢量共点时所构成平面与滑动面的交线，需根据具体情况具体分析。文中累积滑动位移与动安全系数的计算均是在上述假定下进行的。

2.2 接触面识别及面积计算

块体在地震荷载作用下发生滑动，决定块体所受总黏聚力大小的块体接触面积会随之减小，将对块体稳定产生不利影响。因此，提出了一种接触面识别及其面积计算方法，以便于将该影响考虑在内。主要包括 3 个方面：首先，将块体在 3 维空间平面转换到新坐标系下 2 维平面内；其次，凸形面滑动后的接触面积识别及面积计算；最后，利用凸形面接触面积计算方法间接求解凹形面接触面积。

2.2.1 三维空间平面转换为二维平面

(1) 如图 3 所示，在某一空间平面上任选 3 个不重合的点，在大地坐标系下可以矢量形式分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \vec{p}_1 &= (p_1(x), p_1(y), p_1(z)) \\ \vec{p}_2 &= (p_2(x), p_2(y), p_2(z)) \\ \vec{p}_3 &= (p_3(x), p_3(y), p_3(z)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 由此确定平面上两个矢量，并分别记为：

$$\vec{v}_x = \vec{p}_2 - \vec{p}_1, \quad \vec{v}_y = \vec{p}_3 - \vec{p}_1。$$

(3) 将 \vec{v}_x 作为新坐标系的 x 轴。计算 $\vec{v}_z = \vec{v}_x \times \vec{v}_y$ ，并将 \vec{v}_z 作为新坐标系的 z 轴。计算 $\vec{v}_y = \vec{v}_z \times \vec{v}_x$ ，并将 \vec{v}_y 作为新坐标系的 y 轴。然后将 3 个矢量单位化，分别记为

$$\left. \begin{aligned} \vec{e}_1 &= (e_1(x), e_1(y), e_1(z)) \\ \vec{e}_2 &= (e_2(x), e_2(y), e_2(z)) \\ \vec{e}_3 &= (e_3(x), e_3(y), e_3(z)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(4) 空间平面上任意一点可以矢量形式表示为： $\vec{p}_a = (p_a(x), p_a(y), p_a(z))$ 。令 $\vec{p}_h = \vec{p}_a - \vec{p}_1$ ，则 $\vec{p}_h = (p_h(x), p_h(y), p_h(z))$ 。

那么该点在新的坐标系下可以表示为： $\vec{p}_n = (p_n(x), p_n(y), p_n(z)) = (p_h \cdot \vec{e}_1, p_h \cdot \vec{e}_2, p_h \cdot \vec{e}_3)$ ，其中 $p_n(z)$ 必为 0。至此，就将块体三维空间的平面转换到新坐标系下的 v_x - v_y 二维平面内，也即将空间平面的接触面积计算简化为二维平面内接触面积计算。

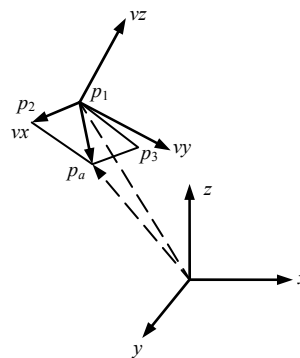


图 3 平面转换示意图
Fig.3 Transformation of plane from 3D to 2D

2.2.2 凸形面接触面识别及面积计算

(1) 设定凸形面上顶点按逆时针方向排列。设该面上滑动前任一顶点坐标为 $A = (x, y)$ ，滑动后该点坐标为 $A' = (x', y')$ 。滑动距离为 D ，沿着滑动方向上的单位矢量为： $\vec{e} = (l, m)$ ，则 $A' = (x + Dl, y + Dm)$ 。

(2) 求两条直线的交点。

已知直线上两点为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ，那么由此两点确定该直线的公式为 $kx + by + c = 0$ ，其中 $k = y_2 - y_1$ ， $b = x_1 - x_2$ ， $c = y_1x_2 - y_2x_1$ ，则两条直线联立求得交点为

$$\begin{cases} k_1x + b_1y + c_1 = 0 \\ k_2x + b_2y + c_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = \frac{b_1c_2 - c_1b_2}{k_1b_2 - k_2b_1} \\ y = \frac{k_2c_1 - k_1c_2}{k_1b_2 - k_2b_1} \end{cases} \quad (4)$$

据此即可得到滑动前后结构面 B 与 B' 各边表达式，进而求出 B 面各边与 B' 面各边的所有可能的交点。

(3) 如图 4 所示，粗线部分即为接触面。判断交点 (x, y) 是否位于接触面内：若交点 (x, y) 既存在于 B 面内，又存在于 B' 面内，则其必然位于接触面内。首先，求出点 (x, y) 与 B 和 B' 各边组成的有向三角形的二维单纯形积分：

$$J = \frac{1}{2!} \begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_{i+1} & y_{i+1} \end{vmatrix} \quad (5)$$

式中： (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) 分别为逆时针方向排列的相邻顶点。

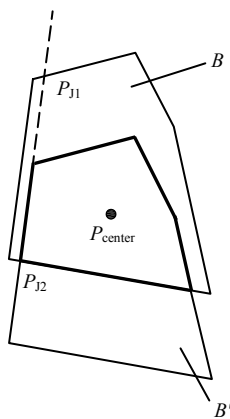


图 4 接触面识别及面积计算
Fig.4 Contact area identification and area computation

然后，判断 $J \geq 0$ ，则计数 1 次，否则进入下一循环。若对 B 面与 B' 面的计数次数相等，且等于其边数，则可确定点 (x, y) 为接触面的一个顶点。图 4

中，交点 P_{11} 不是它的顶点，而交点 P_{12} 是它的顶点。

(4) 按照上述同样的方法，判断滑动前后 B 面与 B' 面上的顶点是否位于对方的面内，若是，则此顶点即为接触面的一个顶点。至此，即可找到构成接触面的所有顶点。

(5) 构成接触面的各个顶点的连接顺序不同，构成的凸形面各不相同，甚至无法构成。因此，需要找出所有逆时针方向的顶点连接顺序，若找到一个能够正确地确定凸形面的连接顺序，即可跳出循环。

首先，确定所有顶点的 x 与 y 方向的最小值与最大值， $\min X$ 与 $\max X$ ， $\min Y$ 与 $\max Y$ 。令 $x = [\min X + \max X] / 2$ 与 $y = [\min Y + \max Y] / 2$ 作为接触面内一点 $P_{center}(x, y)$ ，将 $P_{center}(x, y)$ 与上述连接顺序确定的各边组成有向三角形，并计算其单纯形积分。若其值大于等于 0，则计数 1 次；若循环完所有边后的最终计数值等于其边数，则此连接顺序即可正确地确定凸形面。

例如，对于 4 个顶点的面，各顶点为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。共有 24 种排列方式： P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 ， P_1 、 P_2 、 P_4 、 P_3 ， P_1 、 P_3 、 P_2 、 P_4 ， P_1 、 P_3 、 P_4 、 P_2 ， P_1 、 P_4 、 P_2 、 P_3 ， P_1 、 P_4 、 P_3 、 P_2 ……若 P_1 、 P_4 、 P_3 、 P_2 满足上述要求，即可确定它们所组成的凸形面，按逆时针方向依次连接各顶点即可。

(6) 求接触面积。按下列公式来计算面积：

$$area = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_{i+1} & y_{i+1} \end{vmatrix} \quad (6)$$

式中： (x_i, y_i) 与 (x_{i+1}, y_{i+1}) 为接触面的由上述连接顺序确定的相邻顶点坐标， n 为接触面边数。

2.2.3 凹形面接触面积计算

如图 5 所示，粗线部分即为凹形面 $ABCDEA$ 滑动后的接触面。凹形面接触面积可通过上述凸形面接触面积计算方法间接求得。凹形面的接触面积可以表示为 $S_{contact} = S_{FB'GD} - (S_1 + S_2) - (S_2 + S_3) + S_2$ 。其中： $S_{contact}$ 为凹形面 $ABCDEA$ 与滑动后凹形面 $A'B'C'D'E'A'$ 的接触面积， $S_{FB'GD}$ 表示凸形面 $ABCD$ 与其滑动后凸形面 $A'B'C'D'A'$ 的接触面积， $(S_1 + S_2)$ 表示补充凸形面 AED 与凸形面 $FB'GD$ 的接触面积， $(S_2 + S_3)$ 表示凸形面 $A'E'D'$ 与凸形面 $FB'GD$ 的接触面积， S_2 表示凸形面 AED 与凸形面 $A'E'D'$ 的接触面积。

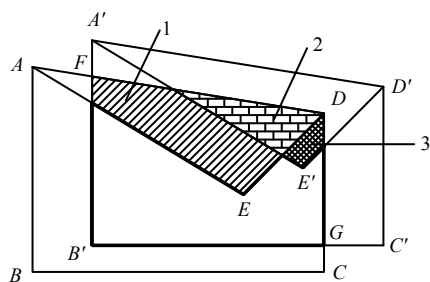


图 5 凹形面接触面积计算

Fig.5 Computation of contact area of the concave area

2.3 安全系数及累积滑动位移计算

(1) 块体沿单面滑动时，净滑动力及安全系数分别为

$$F = T_i - (N_i f_i + C_i S_i) \quad (7)$$

$$K = \frac{N_i f_i + C_i S_i}{T_i} \quad (8)$$

式中： f_i 、 C_i 分别为滑动面*i*的摩擦系数和黏聚力； S_i 为块体*i*滑动面面积； N_i 、 T_i 为合力 \vec{R} 在滑动面*i*上沿法向和沿滑动方向上的分量，且有

$$N_i = -\vec{R} \times \vec{V}_i \quad (9)$$

$$T_i = \left| \vec{V}_i \times \vec{R} \right| \quad (10)$$

式中： \vec{V}_i 为滑面指向块体的单位方向矢量。

块体单面滑动方向 \vec{S}_i 为

$$\vec{S}_i = \frac{(\vec{n}_i \times \vec{R}) \times \vec{n}_i}{\left| \vec{n}_i \times \vec{R} \right|} \quad (11)$$

式中： \vec{n}_i 为滑面向上的单位法向矢量。

(2) 块体沿双面滑动时，净滑动力及稳定安全系数计算公式分别为

$$F = T - (N_i f_i + N_j f_j + S_i C_i + S_j C_j) \quad (12)$$

$$K = \frac{N_i f_i + N_j f_j + S_i C_i + S_j C_j}{T} \quad (13)$$

其中：

$$N_i = \frac{\left| (\vec{R} \times \vec{n}_i) \cdot (\vec{n}_i \times \vec{n}_j) \right|}{\left| \vec{n}_i \times \vec{n}_j \right|^2} \quad (14)$$

$$N_j = \frac{\left| (\vec{R} \times \vec{n}_i) \cdot (\vec{n}_i \times \vec{n}_j) \right|}{\left| \vec{n}_i \times \vec{n}_j \right|^2} \quad (15)$$

$$T = \frac{\left| \vec{R} \cdot (\vec{n}_i \times \vec{n}_j) \right|}{\left| \vec{n}_i \times \vec{n}_j \right|} \quad (16)$$

块体沿双面滑动的滑动方向 \vec{S}_{ij} 为

$$\vec{S}_{ij} = \frac{\vec{n}_i \times \vec{n}_j}{\left| \vec{n}_i \times \vec{n}_j \right|} \text{sign}((\vec{n}_i \times \vec{n}_j) \cdot \vec{R}) \quad (17)$$

(3) 计算累积滑动位移

根据牛顿第二定律，计算加速度为

$$a = \frac{F}{m} \quad (18)$$

式中： m 为块体质量。

块体滑动方向不变，即沿直线运动，假定加速度在每个时段内保持为恒量，则块体速度为

$$v(T_{n+1}) = v(T_n) + a(T_n) \cdot \Delta t \quad (19)$$

式中： $a(T_n)$ 为 T_n 时刻块体加速度。

累积滑动位移为

$$s(T_{n+1}) = s(T_n) + v(T_n) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a(T_n) \cdot \Delta t^2 \quad (20)$$

当 $a(T_n) < 0$ 时，若 $v(T_n) + a(T_n) \cdot \Delta t < 0$ ，则在此

时段内 $\Delta t = \frac{v(T_n)}{\left| a(T_n) \right|}$ 。

3 算例

大地坐标系下 x 、 y 与 z 三个方向的地震加速度时程曲线如图 6 所示。该地震历时 60 s，记录间隔为 0.02 s。为了更好地表明地震效应，将图 6 中 3 个方向的地震加速度均扩大 10 倍。下文将在此地震加速度时程曲线下对块体进行动力稳定分析。

3.1 凹形块体 1010、1111 信息

此块体取自于三峡升船机乘船箱左侧边坡，由 T2、T13、f603、T15 及边坡开挖面构成，其中 T_n 为结构面，f603 为断层。块体编号为 1010、1111，其中“1”表示结构面或开挖面下半空间，“0”表示结构面或开挖面上半空间，“，”以前部分表示岩体结构面；“，”以后部分表示岩体开挖面。

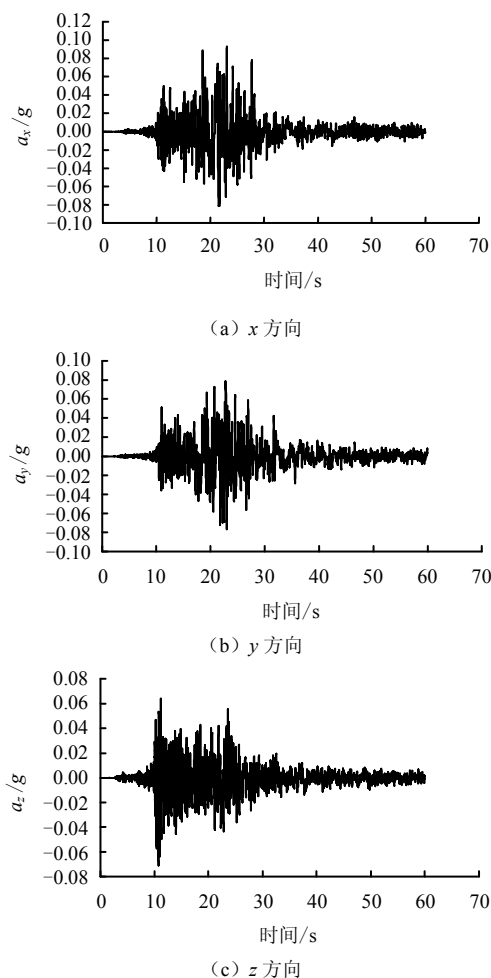


图6 地震加速度时程曲线

Fig.6 Time-dependent curves of earthquake acceleration

表1、2分别列出了凹形块体1010, 11111的结构面、开挖面产状及出露点位置, 点坐标取值于大地坐标系, 即x指向东, y指向北, z向上。块体的体积为17487.41 m³, 密度为2.7 g/cm³。

块体的形状如图7所示, 1'~9'代表表面的编号, 1~14代表顶点编号。可见5'、6'面(即开挖面P1和P4)以及8'、9'面(即开挖面P3和P5)组成两个凹形区域。

表1 结构面、断层及开挖面信息

Table 1 Information of structural planes, fault and excavation faces

面类	倾角/(°)	倾向/(°)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
结构面 T2	63	53.0	35	200
结构面 T13	60	250.0	35	200
断层 f603	81	330.0	35	200
结构面 T15	40	135.0	35	200
开挖面 P1	65	213.5	0	0
开挖面 P4	0	0	0	0
开挖面 P2	90	213.5	0	0
开挖面 P3	58	181.5	0	0
开挖面 P5	0	0	0	0

表2 结构面、断层以及开挖面通过点坐标

Table 2 Coordinates of points structural planes, fault and excavation faces go through

面类	x/m	y/m	z/m
结构面 T2	18.5	34.3	125.3
结构面 T13	27.8	44.5	98.7
断层 f603	18.5	34.3	125.3
结构面 T15	21.0	11.4	68.0
开挖面 P1	18.5	34.3	125.3
开挖面 P4	2.7	29.9	99.0
开挖面 P2	21.0	11.4	68.0
开挖面 P3	23.0	30.1	123.1
开挖面 P5	33.9	3.0	84.0

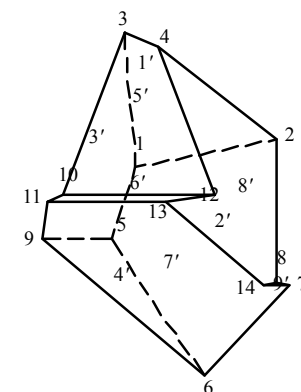


图7 凹块体1010, 11111形状

Fig.7 Shape of the concave block 1010, 11111

3.2 临界剪应变取值

硬性结构面的剪应力与剪位移全过程曲线如图8所示。当剪切位移达到临界值时, 结构面的抗剪强度由峰值强度跌至残余强度。取在该结构面上沿着剪切方向的基线长度为20 cm, 根据第2.1节的定义, 剪切位移与其比值即为沿着该方向的剪应变, 从而得到图9所示的硬性结构面的剪应力与剪应变的全过程曲线。可见当剪应变达到 2.401×10^{-3} 时, 结构面强度由峰值跌至残余值。根据试验报告统计, 取残余强度的摩擦角为27°, 黏聚力为100 kPa。

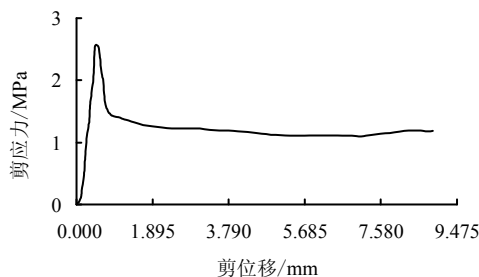


图8 硬性结构面的剪应力与剪位移全过程曲线

Fig.8 Hard structural plane's complete curve of shear stress and shear displacement

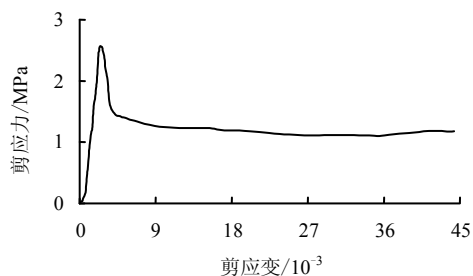


图 9 硬性结构面的剪应力与剪应变全过程曲线
Fig.9 Hard structural plane's complete curve of shear stress and shear strain

3.3 凹形块体 1010, 1111 动力稳定分析

由程序判断可知，整个地震过程中块体沿着图 7 所示的凹形面 2 和凸形面 4（即 T13 与 T15）的交线（顶点 5 和 6 组成）滑动，该交线长即为沿着剪切方向的基线长度 36.52 m。当累积滑动位移与基线的比值，即剪应变大于 2.401×10^{-3} 时，结构面抗剪强度将会跌至残余强度。图 10 和 11 给出了 2 和 4 滑动面的形状、面积等相关信息。

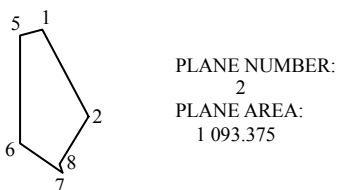


图 10 滑动面 2 示意图
Fig.10 Shape of sliding face 2

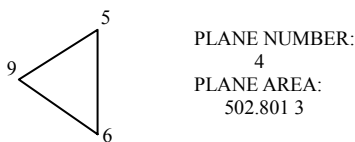


图 11 滑动面 4 示意图
Fig.11 Shape of sliding face 4

图 12 所示为以下 3 种情况下的安全系数对比曲线：①考虑接触面抗剪强度演化，不考虑面积变化；②考虑接触面抗剪强度演化以及面积变化；③不考虑接触面抗剪强度演化以及面积变化。很明显可以看出，在 10~30 s 的强震区内，3 种情况下的安全系数均达到了各自的最小值。在剪应变达到临界值 2.041×10^{-3} 之前，3 种情况下的安全系数相同。而在达到临界值以后，安全系数发生了很大变化。此时第 3 种情况下的安全系数要明显地大于前两种情况下的安全系数，最终大概在 2.2~2.7 内波动。前两种情况下，安全系数最终在 1.3~1.7 内波动。其中第 1 种情况的安全系数要略高于第 2 种情况，可见

接触面积的减小使得安全系数变小，凸显了接触面的影响作用，进而说明此程序分析可用于块体滑动的大变形动力稳定分析。

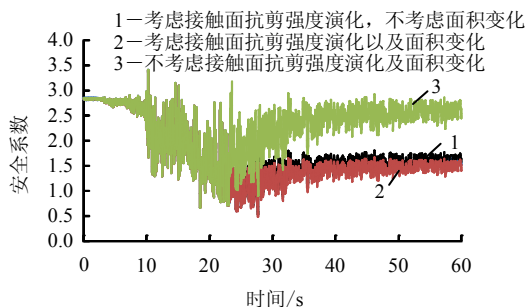


图 12 安全系数对比曲线
Fig.12 Comparison curves of safety factor

图 13 为同样 3 种情况下块体累积滑动位移对比曲线。第 3 种情况，累积滑动位移为 9.05 cm，说明块体并未发生大的滑动。对于前两种情况，很明显可以看出，在达到剪切应变临界值 2.401×10^{-3} ，即累积滑动位移达到 0.087 7 m 之前，两者位移保持一致，基本为 0，块体仅发生轻微滑动。在达到临界剪应变以后，累积滑动位移分别达到 2.82 m 和 5.04 m，说明块体发生了比较大的滑动。第 2 种情况下块体的滑动程度较之第 1 种情况更为严重，再次证实了接触面积大小对块体稳定的重要影响。

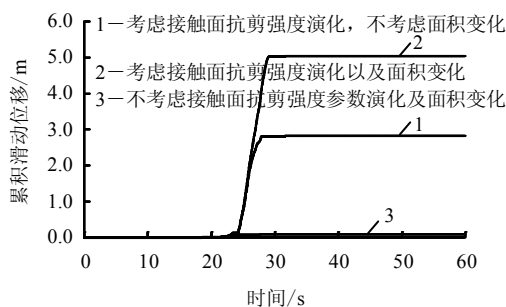


图 13 累积滑动位移对比曲线
Fig.13 Comparison curves of accumulated sliding displacement

如图 14 可见，在强震区伴随着结构面抗剪强度的减弱，块体发生了滑动，其接触面积分别减少了 16% 和 25%，削弱了黏聚力对块体稳定的有利作用。

根据动安全系数以及累积滑动位移曲线综合分析，第 3 种情况下，块体仅发生轻微滑动，强震区后安全系数较高，说明块体是稳定的；第 1 和 2 种情况下，块体在强震区发生了大的滑动，不能保持稳定；但强震过后又静止不动，且震后安全系数大于 1.3，故认为震后块体依然能够保持稳定。

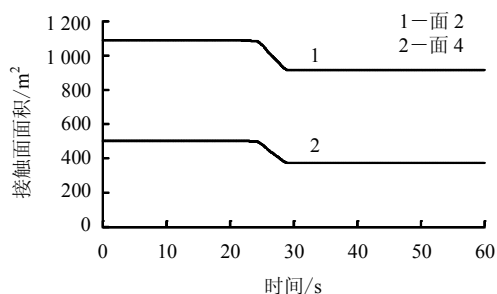


图 14 接触面积变化曲线
Fig.14 Variation curves of contact area

4 结 论

本文将块体理论从原来的静力稳定分析扩展到了动力稳定分析领域,从一定程度上推动了它的发展,扩大了未来应用的范围,可谓是一次有益的尝试。

(1) 提出了以块体累积滑动位移和动安全系数两个指标共同评价块体动力稳定性。

(2) 提出了一种新的接触面识别及面积计算方法,很好地考虑了接触面积减小对块体稳定性的不利影响,进而也适用于大变形分析。

(3) 考虑到了块体滑动前后结构面抗剪强度的参数演化,具有重要的物理意义。

(4) 可对复杂的凸形及凹形块体进行静动力稳定分析。

(5) 将其应用于三峡升船机乘船箱左侧边坡的块体稳定分析中,证实了算法的可行性及结果的合理性,可为设计提供一定的参考。

文中尚有许多不足之处,亟待改进。也希望本文能起到抛砖引玉的作用,促进块体理论在动力分析方面的发展。

致谢: 本文的工作得到了国家重点基础研究发展计划“973”课题(No. 2011CB013505)的资助,在此谨表谢意!

参 考 文 献

[1] HOEK E, BRAY J W. 岩石边坡工程(第三版)[M]. 卢始宗译. 北京: 冶金工业出版社, 1981.

[2] 王思敬, 张菊明. 岩体结构稳定性的块体力学分析[J]. 地质科学, 1980, (1): 19-33.
WANG Si-jing, ZHANG Ju-ming. On the block mechanics for stability analysis of rock mass structure[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1980, (1): 19-33.

[3] 张菊明, 王思敬. 边坡岩体结构的三维失稳形式及稳定性分析研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(3): 242-249.
ZHANG Ju-ming, WANG Si-jing. On the 3D unstable

rocks and stability analysis of slope rock mass structure[J].

Journal of Engineering Geology, 1997, 5(3): 242-249.

[4] 刘汉东. 考虑地震历时影响的岩质边坡楔体稳定性分析与计算[J]. 华北水利水电学院学报, 1991, (4): 35-40.

LIU Han-dong. Analysis and computation of sliding wedge in rock mass considered influence of earthquake historical time[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1991, (4): 35-40.

[5] 陶丽娜, 张建海, 何江达. 楔形块体的动力稳定分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(3): 24-27.

TAO Li-na, ZHANG Jian-hai, HE Jiang-da. The dynamic stability assessment of wedge blocks[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2002, 34(3): 24-27.

[6] 王思敬, 薛守义. 岩体边坡楔形体动力学分析[J]. 地质科学, 1992, (2): 177-182.

WANG Si-jing, XUE Shou-yi. Dynamic analysis of wedge sliding on rock slopes[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 1992, (2): 177-182.

[7] 石根华. 岩体稳定性分析的赤平投影方法[J]. 中国科学(A辑), 1977, (3): 260-271.

SHI Gen-hua. Stereographic projection methods on rock block stability analysis[J]. *Science in China (Ser. A)*, 1977, (3): 260-271.

[8] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its application to rock engineering [M]. Englewood Cliffs: Prentice-hall Inc., 1985.

[9] 陈斗勇, 蒋晓晃. 岩体转动的块体理论分析[J]. 岩土力学, 1997, 18(3): 24-28.

CHEN Dou-yong, JIANG Xiao-huang. Treatment of rock block rotation by block theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(3): 24-28.

[10] 张子新, 孙钧. 分形块体理论及其在三峡高边坡工程中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(5): 552-557.

ZHANG Zi-xin, SUN Jun. Fractal block theory and its application to the high slope of the three gorges project of the Yangtze River[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1996, 24(5): 552-557.

- [11] MAULDON M, CHOU K C, WU Y. Limit analysis of 2-d tunnel keyblocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3-4): 193.
- [12] 邬爱清. 三峡工程临时船闸及升船机岩体边坡块体稳定性及加固效果研究[R]. 武汉: 长江科学院, 1997.
- [13] 张奇华, 邬爱清. 基于凹形区分类的块体几何形态分析方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 299-303.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing. Morphological analysis method of block based on classification of concave zone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(3): 299-303.
- [14] 张奇华. 基于块体加与减算法的岩石块体几何形态分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 418-424.
ZHANG Qi-hua. Morphological analysis of rock blocks by block adding-subtracting method[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 37(4): 418-424.
- [15] LIU JUN, LI ZHONGKUI, ZHANG ZHUOYUAN. Stability analysis of block in the surrounding rock mass of a large underground excavation[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, 19(1): 35-44.
- [16] ELMOUTTIE MARC, POROPAT GEORGE, KRÄHENBÜHL GRÉGOIRE. Polyhedral modeling of underground excavations[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 4(37): 529-535.
- [17] LI JIANYONG, XUE JIAN, XIAO JUN. Block theory on the complex combinations of free planes[J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, 40: 127-134.
- [18] MITO Y, KIKUCHI K, HIRANO I, et al. Stochastic block theory for initial support decision of large slope[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3-4): 202.e1-202.e19.
- [19] HATZOR Y H, FEINTUCH A. The joint intersection probability[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 42(4): 531-541.
- [20] HATZOR Y H, TALESNICK M, TSESARSKY M. Continuous and discontinuous stability analysis of the bell-shaped caverns at Bet Guvrin, Israel[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(7): 867-886.
- [21] SCOTT G A, KOTTENSTETTE J T. Tunneling under the Apache Trail[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(7): 1485-1489.
- [22] KOTTENSTETTE J T. Block theory techniques used in arch dam foundation stability analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3-4): 163.e1-163.e19.
- [23] 张奇华, 邬爱清, 石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2609-2614.
ZHANG Qi-hua, WU Ai-qing, SHI Gen-hua. Application of key block theory to analysis of rock stability for underground plant in Baise hydraulic project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2609-2614.
- [24] 毛海和, 夏才初, 张子新, 等. 块体理论赤平解析法在龙滩水电站地下厂房洞室群稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1308-1314.
MAO Hai-he, XIA Cai-chu, ZHANG Zi-xin, et al. Application of stereo-analytical method for block theory to the stability of Longtan hydropower station underground power-house[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(8): 1308-1314.
- [25] 杨庆, 杨钢, 王忠昶, 等. 块体理论在荒沟抽水蓄能电站地下厂房系统洞室群围岩稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1618-1624.
YANG Qing, YANG Gang, WANG Zhong-chang, et al. Application of block theory to surrounding rock stability of underground caverns in Huanggou pumped storage station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1618-1624.
- [26] KULATILAKE P H S W, WANG LIANGQING, TANG HUIMING. Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(6): 846-860.
- [27] 刘锦华, 吕祖珩. 块体理论在工程岩体稳定分析中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [28] 徐栋栋. 基于块体理论的块体动力稳定分析方法及应用[硕士学位论文 D]. 武汉: 长江科学院, 2011.
- [29] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(2): 139-160.