

# 土坡抗震稳定性分析的有限元-滑动面法

史宏彦<sup>1</sup>, 谢定义<sup>2</sup>

(1. 汕头大学, 广东 汕头 515063; 2. 西 安理工大学, 陕西 西安 701148)

**摘要:** 提出了一种土坡抗震稳定性分析的新方法, 即将有限元法和传统的滑动面法相结合. 首先根据有限元法通过求解动力方程, 计算出某一时刻土坡内的有效应力, 然后根据有效应力计算该时刻的最危险滑动面及对应的安全系数. 该方法不仅能够考虑土的应力应变性质, 而且能够在任意时刻确定最危险滑动面的位置及安全系数. 给出了该方法的详细算法.

**关键词:** 土坡; 抗震稳定性; 有限元-滑动面法; 安全系数

**中图分类号:** P315.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-0844(2001)01-0046-07

## 0 引言

目前, 对于地震作用下土坡的抗震稳定性分析大多采用拟静力法. 该方法只考虑了地震的动力特性和结构的动力特性, 而没有考虑材料的动力特性. 然而, 由于在动荷载作用下, 土层的应力和应变之间的关系表现出明显的非线性和滞后性, 而且随着动荷载的强度和持续时间的增大, 土的强度明显降低, 甚至发生液化. 在这种情况下, 土的动力特性就成为土坡失稳的重要因素, 此时, 必须同时考虑地震、结构和材料的动力特性. 拟静力法就不再适用了.

本文提出了一种用于土坡抗震稳定性分析的新方法. 该方法以有限元法为基础, 通过求解动力方程, 计算出某一时刻土坡内的应力和动孔隙压力(即有效应力). 然后, 利用有效应力计算该时刻土坡最危险滑动面的位置及相应的安全系数. 这样, 由于采用了有限元法, 因而就可以考虑材料的动力特性; 由于最危险滑动面是按该时刻滑动面上的实际有效应力确定的, 因而该滑动面就能如实地反映该时刻土坡的动力稳定情况. 此外, 由于该方法可在地震过程的任意时刻确定最危险滑动面, 因而也就能够反映出地震过程中土坡的稳定性变化特征, 确定出产生滑坡的时刻. 由于在土坡的有限元分析中绝大多数单元为直边单元(对非直边单元, 亦可在划分单元时按一定方式用直边处理), 故本文以 8 结点直边单元为例, 采用圆弧滑动面和能够考虑土体液化情况的等效线性有效应力分析法, 给出该方法的详细算法. 但应指出的是, 对于其它类型的单元或非圆弧滑动面, 只需在相关方面加以修改, 本文所提出的方法也是适用的.

## 1 计算方法

### 1.1 某时刻土坡内有效应力的计算<sup>[1]</sup>

#### 1.1.1 计算土坡内的静应力

为了考虑土的非线性, 应将静荷载分级施加, 并按每级荷载施加后土中应力应变的变化情况, 修正力学参数. 其本构关系可以采用邓肯-张模型, 也可采用弹塑性模型或其它模型. 当所有静荷载施加后, 计算出的累积应力即为震前土坡中的静应力.

### 1.1.2 确定地震加速度时程关系并输入

根据土坡抗震设计要求, 确定地震加速度时程关系, 然后采用二级时段法输入<sup>[3]</sup>. 这里, 一级时段是指地震加速度曲线发生转折的相邻 2 个转折点之间的时段; 二级时段也称为计算时段, 是指将一级时段按积分稳定性和计算精度要求, 均匀等分的每个等份时段.

### 1.1.3 动力反应计算

该部分计算是为了确定某一时刻土坡内的动应力和动孔隙压力. 按以下步骤进行:

(1) 对一级时段循环.

(2) 假定单元的初始动剪切模量  $G_{i-1}$  和阻尼比  $\lambda_{i-1}$ .

(3) 对该一级时段内的所有二级时段循环, 计算出该一级时段内的动剪应变时程关系及平均动剪应变  $\gamma$  (取最大动剪应变的 65%). 为此, 需在每个二级时段内求解动力方程

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{R(t)\}$$

式中:  $[M]$ 、 $[C]$  和  $[K]$  分别为总体质量、阻尼和刚度矩阵,  $\{R(t)\}$  为结点动荷载向量,  $\{\ddot{\delta}\}$ 、 $\{\dot{\delta}\}$  和  $\{\delta\}$  分别为结点相对加速度、速度和位移.  $[C]$  可用瑞利公式计算.

(4) 根据平均动剪应变  $\gamma$ , 用 Hardin 公式计算动剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$ .

$$G = k_2(\sigma_m)^{0.5} / (1 + \gamma_h), \quad \lambda = \lambda_{\max} \gamma_h / (1 + \gamma_h), \quad \gamma_h = \gamma [1 + a \exp(-b\gamma/\gamma_r)] / \gamma_r$$

式中:  $\lambda_{\max}$ 、 $k_2$ 、 $a$ 、 $b$  为试验参数,  $\gamma_r$  为参考应变,  $\sigma_m$  为平均有效应力.

(5) 如果计算出的  $G$  与初始假定不符, 则回到第 (3) 步进行迭代计算, 直到满足允许误差为止. 求出该一级时段的平均动剪应力 (取该一级时段内最大动剪应力的 65%).

(6) 确定该一级时段的等效周数及液化次数. 前者可采用 Martin 方法<sup>[1]</sup>, 后者可由液化曲线查得.

(7) 计算该一级时段结束时的动孔隙压力和有效应力. 孔隙压力计算模式可通过动力试验确定.

至此, 该一级时段的动力反应计算已完成. 通过前述的静力和动力计算, 可以得到土坡内某些点 (通常为单元内的高斯积分点) 的有效应力.

## 1.2 土坡抗震稳定性验算

通过验算可以确定该时刻土坡的最危险滑动面及相应的最小安全系数. 搜寻最危险滑动面的方法有多种, 如网格搜寻法<sup>[3]</sup> 和二分法<sup>[4]</sup>. 但无论采用何种方法, 均需假定多个滑动面进行试算. 以下以某一滑动面  $S$  (圆心坐标为  $(x_s, y_s)$ , 半径为  $R_s$ ) 为例, 给出其安全系数的计算方法. 对其它假定的滑动面, 可仿照进行.

### 1.2.1 相交单元的判别

如果滑动面与某单元的至少一个边相交, 则称该单元为相交单元, 反之为非相交单元. 设滑动面  $S$  的圆心到某一单元第  $j$  个结点 ( $j = 1, 2, \dots, n_e$ ,  $n_e$  为单元结点总数) 的距离为  $L_j$ , 且  $\Delta_j = L_j - R_s$ . 这样, 如果  $\Delta_j > 0$  或  $\Delta_j < 0$ , 则表示该单元位于滑动面之外或之内, 为非相交单元, 反之为相交单元. 对所有单元循环, 则可判别出相应于滑动面  $S$  的所有相交单元. 显然, 滑动面只通过相交单元, 其安全系数的计算也仅与相交单元有关.

### 1.2.2 建立相交单元内任意点处的有效应力计算公式

当有限元计算完成后, 在整个土坡内, 除了有限个点 (通常为高斯积分点) 处的有效应力已

知外, 其它地方的有效应力是未知的. 另外, 最危险滑动面的位置及安全系数是通过假定多个不同的滑动面, 由各滑动面上的有效应力确定的. 由于滑动面假定的任意性, 因此, 在一般情况下, 滑动面上绝大多数地方的有效应力是未知的. 由此可见, 为了计算出滑动面的安全系数, 首先应当利用已计算出的高斯点上的有效应力, 建立相交单元内任意点处的有效应力计算公式.

对于 8 结点等参元, 单元内任意点处的某一应力分量, 例如  $\sigma_x$ , 可采用 Hinton 等人提出的如下方法计算<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_x = \sum_{i=1}^4 N_i \sigma_{xi}, \quad N_i = (1 + \zeta_i \zeta)(1 + \eta_i \eta)/4 \quad (1)$$

式中:  $(\zeta, \eta_i)$  和  $\sigma_{xi}$  分别为单元第  $i$  个角点的局部坐标和  $x$  向应力. 由于式(1)对单元内各点均适用, 因此, 将单元内  $2 \times 2$  个高斯点处的局部坐标及  $x$  向应力  $\sigma_{xi}^*$  代入, 建立 4 个线性方程, 进而计算出  $\sigma_{xi}$ . 这样, 只要知道单元内某点的局部坐标  $(\zeta, \eta)$ , 即可计算出该点的  $\sigma_x$ . 对其它应力分量  $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$ , 可仿照进行.

对于其它类型的单元, 甚至 8 结点等参元, 也可采用如下方法建立相交单元内任意点处的应力计算公式. 根据弹性力学理论, 满足平面问题平衡方程的各应力分量可表示如下:

$$\sigma_x = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \alpha_6 y^2 + \dots \quad (2)$$

$$\sigma_y = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 x^2 + \beta_5 xy + \beta_6 y^2 + \dots \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \gamma_1 - \beta_3 x - \alpha_2 y - 0.5\beta_5 x^2 - 2(\alpha_4 + \beta_6)xy - 0.5\alpha_3 y^2 + \dots \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i, \beta_i$  和  $\gamma_i$  为待定参数. 应当指出的是, 上述多项式项数的选择并非越多越好. 这是由于有限元的应力解有在其真解周围振荡的特点. 过多的项数可能导致计算出的应力呈虚假的波浪形分布. 在一般情况下选择前 3 项就可以了. 由于上述 3 式对单元内任意点均适用, 因此, 对第  $i$  个高斯点, 设整体坐标为  $(x_i^*, y_i^*)$ , 由有限元计算出的有效应力为  $\sigma_{xi}^*$ , 则单元内  $n_g$  个

高斯点上应力的均方误差之和为  $\sum_{i=1}^{n_g} [\sigma_{xi}(x_i^*, y_i^*) - \sigma_{xi}^*]^2$ . 建立最小二乘泛函:

$$\epsilon = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_g} [\sigma_{xi}(x_i^*, y_i^*) - \sigma_{xi}^*]^2 \quad (5)$$

对式(5)泛函变分, 有

$$\partial \epsilon / \partial \alpha_j = 0 \quad (j = 1, 2, 3)$$

即

$$\begin{bmatrix} n_g & \sum x_i^* & \sum y_i^* \\ \text{对} & \sum (x_i^*)^2 & \sum x_i^* y_i^* \\ \text{称} & & \sum (y_i^*)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum \sigma_{xi}^* \\ \sum \sigma_{xi}^* x_i^* \\ \sum \sigma_{xi}^* y_i^* \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $\sum = \sum_{i=1}^{n_g}$ . 由式(6)可以解出  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$ . 这样, 只要知道单元内某点的整体坐标  $(x, y)$ , 即可由式(2)计算出对应的  $\sigma_x$ . 对  $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$  的计算, 可仿照  $\sigma_x$  的计算步骤进行. 对 8 结点等参元, 按照式(1)和式(2)~(4)计算出的应力相差一般不超过 3%.

### 1.2.3 计算滑动面与相交单元各边的整体交点坐标

以相交单元的某一角点为起点, 按一定方向(如逆时针方向)对单元各边循环, 用相邻二角点构成的直线方程与假定的滑动面方程  $(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 = R_s^2$  联立求解, 即可计算出滑

动面与相交单元各边的整体交点坐标. 显然, 整个滑动面被相交单元分割成若干个滑弧段. 这里, 滑弧段是指相邻二个整体交点之间的滑弧.

1.2.4 计算滑弧段上各子段的有效应力

为了比较准确地计算出滑动面的安全系数, 应按照弧的长短和应力变化的大小, 将各滑弧段再分为若干个子段. 每一子段上的应力可用该子段中点上的应力近似代表.

如图 1(a)所示, 设某相交单元与滑弧  $S$  形成的某一滑弧段为  $AB$ .  $A$  和  $B$  2 个点的整体交点坐标分别为  $(x_A, y_A)$  和  $(x_B, y_B)$ . 则滑弧段  $AB$  对应的圆心角  $\alpha$  为:

$$\alpha = 2 \sin^{-1} [ \overline{AB} / (2R_s) ] \tag{7}$$

式中:  $\overline{AB} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$ . 假如滑弧段  $AB$  按  $\alpha$  均匀等分为  $m$  个子段, 第  $j$  个子段的起点  $A_j$  和终点  $B_j$  的坐标分别为  $(x_{j-1}, y_{j-1})$  及  $(x_j, y_j)$ , 中点  $D_j$  的坐标为  $(\bar{x}_j, \bar{y}_j)$ . 则从图 1(b) 有:

$$\bar{x}_j = x_s - |k_j| R_s / \left( k_j \sqrt{1 + k_j^2} \right), \quad \bar{y}_j = y_s - |k_j| R_s / \sqrt{1 + k_j^2} \tag{8}$$

$$k_j = \left[ k_{j-1} + \tan \frac{\bar{\alpha}}{2} \right] \left[ 1 - k_{j-1} \tan \frac{\bar{\alpha}}{2} \right], \quad k_{j-1} = \frac{y_s - y_{j-1}}{x_s - x_{j-1}}, \quad \bar{\alpha} = \alpha / m \tag{9}$$

将式(9)中的  $\bar{\alpha}/2$  换为  $\bar{\alpha}$ , 则式(8)中的  $\bar{x}_j, \bar{y}_j$  即为  $B_j$  点的坐标  $x_j, y_j$ . 显然, 对第一子段 ( $j = 1$ ),  $x_{j-1} = x_A, y_{j-1} = y_A$ ; 对最后一个子段 ( $j = m$ ),  $x_j = x_B, y_j = y_B$ . 并且,  $B_j$  点即为下一子段的起点.

求出  $D_j$  点的整体坐标后, 如果采用式(2) ~ (4) 计算该点处的应力  $\sigma_{xj}, \sigma_{yj}$  和  $\tau_{xyj}$ , 只需将  $\bar{x}_j, \bar{y}_j$  代入. 对 8 结点等参元, 如果按式(1) 计算  $D_j$  处的应力, 还需计算出  $D_j$  点对应的局部坐标  $(\zeta_j, \eta_j)$ . 当按图 1(a) 的方式对单元结点编号, 并且各边角点之间的结点(如 1—2 边之间的结点 5) 位于边中时, 由

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^8 N_i(\zeta_j, \eta_j) x_i \quad \text{和} \quad \bar{y}_j = \sum_{i=1}^8 N_i(\zeta_j, \eta_j) y_i \tag{10}$$

可推出以下方程:

$$(b_1 a_3 - b_3 a_1) \eta_j^2 + (a_1 b_6 - b_1 a_6 + b_2 a_3 - a_2 b_3) \eta_j + (a_2 b_6 - a_6 b_2) = 0 \tag{11}$$

$$a_1 \zeta_j \eta_j + a_2 \zeta_j + a_3 \eta_j - a_6 = 0 \tag{12}$$

式中:  $(x_i, y_i)$  和  $N_i$  分别为单元第  $i$  个结点的整体坐标和形函数,  $a_1 = x_1 + x_3 - x_2 - x_4$ ,  $a_2 = x_2 + x_3 - x_1 - x_4$ ,  $a_3 = x_3 + x_4 - x_1 - x_2$ ,  $a_4 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$ ,  $a_5 = 4\bar{x}_j$ ,  $a_6 = a_5 - a_4$ . 将  $a_k (k = 1 \sim 6)$  中的  $x_i$  换为  $y_i$ ,  $\bar{x}_j$  换为  $\bar{y}_j$ , 可计算出  $b_k$ . 求解方程(11) 和(12), 可得到  $D_j$  点的局部坐标  $(\zeta_j, \eta_j)$ . 但应注意  $|\zeta_j| \leq 1, |\eta_j| \leq 1$ . 求出  $\zeta_j$  和  $\eta_j$  后, 代入式(1) 可计算出

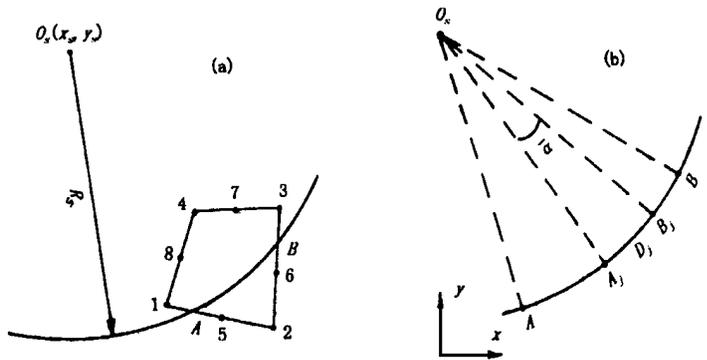


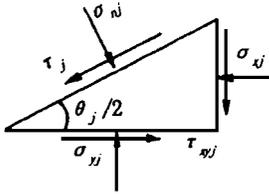
图 1 交点坐标和滑弧子段中点坐标的确定

Fig. 1 Determining coordinates of intersection point and center of sub-section of arc slip surface.

$D_j$  点的  $\sigma_{xj}$ 、 $\sigma_{yj}$  和  $\tau_{xyj}$ .

### 1.2.5 计算滑弧子段上的有效法向应力和切应力

如前所述,滑弧子段上的应力可用该子段中点处的应力代表.为此,可通过在该点取微元体(图2),根据力的平衡条件计算出该子段上的有效法向应力  $\sigma_{nj}$  和切向应力  $\tau_j$ ,即



$$\sigma_{nj} = \frac{\sigma_{xj} + \sigma_{yj}}{2} + \frac{\sigma_{yj} - \sigma_{xj}}{2} \cos \theta_j - \tau_{xyj} \sin \theta_j \quad (13)$$

$$\tau_j = \frac{\sigma_{yj} - \sigma_{xj}}{2} \sin \theta_j + \tau_{xyj} \cos \theta_j \quad (14)$$

式中:  $\theta_j = 2 \tan^{-1} [(y_j - y_{j-1}) / (x_j - x_{j-1})]$ . 应当指出的是, 当在静力条件下计算滑动面的安全系数时, 前述应力仅指由静荷载作用产生的静应力; 在动力条件下计算某一时刻的安全系数时, 前述应力是指该时刻静、动荷载共同作用下产生的应力. 此外, 所有正应力均指的是有效应力.

图2 滑弧子段法向和切向应力的确定

Fig.2 Determining positive stress and tangential stress of sub-section of arc slip surface.

### 1.2.6 计算滑动面的安全系数

设滑动面  $S$  被相交单元分割为  $n$  个滑弧段, 第  $i$  个滑弧段又被分为  $m_i$  个子段, 则该滑动面的安全系数

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (\sigma_{nj} \tan \Phi_j + c_j) \Delta l_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \tau_j \Delta l_j} \quad (15)$$

式中:  $\Delta l_j$  和  $c_j$ 、 $\Phi_j$  分别为第  $j$  个子段的弧长和有效抗剪强度指标. 当考虑液化问题时, 如果子段中点处的平均有效应力等于零, 则意味着该子段的土体已液化<sup>[1]</sup>, 故  $\sigma_{nj} = 0$ .

至此, 可计算出某一滑动面的安全系数. 对其它假定的滑动面, 逐个进行计算. 从所计算出的这些滑动面的安全系数中寻找出最小者, 该最小安全系数所对应的滑动面即为该时刻土坡的最危险滑动面. 对地震过程中的其它时刻, 按照上述方法继续计算, 直到地震结束.

## 2 算例

上述将有限元与滑动面法相结合的计算方法, 只需增加一个子程序, 就可以与一般的动力反应分析法配合使用, 判定土坡的动力稳定性. 显然, 该方法也适用于静力条件下的土坡稳定性分析.

假设一个如图3所示的简单土坡, 坡高20m. 将该土坡划分为79个8结点等参元和2个6结点等参元, 280个结点(单元划分图略). 静力计算的本构关系采用邓肯-张模型. 动力计算时仅输入了基岩水平向地震动, 加速度幅值为0.1g(图4). 静力和动力计算参数见表1(为简单起见, 假定静、动条件下土的抗剪强度指标相同). 采用网格搜寻法确定最危险滑动面. 静力加载结束和地震动过程中20个不同时刻最危险滑动面的位置及最小安全系数见表2. 由计算结果可见:

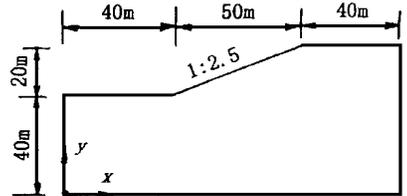


图3 土坡剖面  
Fig.3 A section of soil slope.

由计算结果可见:

(1) 在静力条件下, 对图3所示的简单土坡, 文献[6]采用瑞典圆弧法, 给出了最危险滑动面的理论解: 圆心坐标  $x = 56.15$  m,  $y = 86.30$  m, 半径  $R = 50.32$  m, 最小安全系数  $F_s = 2.0$ . 与表2中  $t = 0$  时刻(即静力条件下)的计算结果比较可见, 二者的最危险滑动面位置相当接

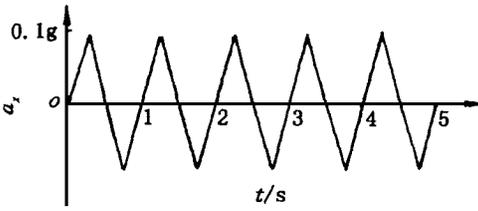


图 4 输入的水平地震加速度  
Fig. 4 Input horizontal earthquake acceleration.

近. 应当指出的是, 文献[6]的计算结果考虑了土的应力应变关系, 但是坡内材料则较为简单. 由此可见, 当坡内材料分布比较简单, 滑动面采用圆柱面时, 是否考虑材料的本构关系对最危险滑动面的位置影响不大. 但是, 当坡内材料分布比较复杂时, 该结论是否成立仍需进一步研究. 此外, 从表 2 也可以看出, 用本文考虑土的应力应变关系计算出的最小安全系数要比将土看作刚塑性体时稍有提高.

表 1 计算参数

参数	$C$ /kPa	$\Phi$ /( $^{\circ}$ )	$R_f$	$K$ /kPa	$k_2$ /kPa	$n$	泊松比	$\lambda_{max}$	重度 /[ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	密度 /[ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
静力	40	20	0.9	20 000	—	0.5	0.35	—	18.3	1.865
动力	40	20	—	—	33 600	—	0.35	0.283	18.3	1.865

表 2 最危险滑动面的位置及最小安全系数

时间/s	圆心坐标/m		半径/m	安全系数
	$x$	$y$		
0.00	56.25	83.75	47.37	2.115
0.25	56.25	83.75	47.35	2.035
0.50	55.00	95.00	57.59	1.734
0.75	58.33	71.56	38.88	2.970
1.00	56.67	76.25	41.84	2.515
1.25	53.33	98.75	60.97	1.576
1.50	55.83	89.38	52.60	1.891
1.75	58.75	70.63	38.13	3.034
2.00	56.67	80.00	44.33	2.351
2.25	53.33	98.78	60.97	1.591
2.50	56.67	83.75	47.64	1.933

续表 2

时间/s	圆心坐标/m		半径/m	安全系数
	$x$	$y$		
2.75	58.33	71.09	38.66	2.997
3.00	56.67	80.00	44.33	2.326
3.25	55.00	91.25	54.11	1.598
3.50	56.67	83.75	47.64	1.943
3.75	58.33	71.09	38.66	2.986
4.00	56.67	80.00	44.33	2.318
4.25	55.00	91.25	54.11	1.600
4.50	56.67	83.75	47.64	1.947
4.75	58.33	71.09	38.66	2.983
5.00	56.67	80.00	44.33	2.315

(2) 在动力条件下, 较小的安全系数总是出现在地震加速度指向坡内, 即地震惯性力指向坡外的时刻, 而较大的安全系数总是出现在地震加速度指向坡外的时刻.

(3) 在本文算例中, 动力条件下不同时刻最小安全系数的最小、最大值分别为  $F_{s\min} = 1.576$  和  $F_{s\max} = 3.034$ , 分别出现在 1.25 s 和 1.75 s 时刻. 如果将表 2 中 21 个不同时刻 (包括  $t = 0$  的静力条件下) 的最危险滑动面画在一起, 则可发现,  $F_{s\min}$  对应的滑动面最浅,  $F_{s\max}$  对应的滑动面最深, 其余的滑动面位于二者之间. 并且, 静力条件下的滑动面大致位于  $F_{s\min}$  和  $F_{s\max}$  对应的滑动面中部. 由此可见, 当地震过程中土的性质没有较大变化时, 动力条件下的最危险滑动面基本在静力条件下最危险滑动面的附近.

(4) 由于本算例没有考虑孔隙压力的影响, 土的性质变化较小, 故在地震过程中不同时刻的最小安全系数大致随输入加速度呈周期变化.

### 3 结论

本文提出的土坡有限元-滑动面抗震稳定性分析法, 将有限元法与滑动面法相结合, 不仅可以考虑土的应力应变性质, 使土坡动力稳定性判别更加合理, 而且可以分析土坡稳定性的变

化过程, 预估土坡破坏的趋势. 此外, 该方法只需增加一个独立的子程序, 就可以灵活地和各种动力分析法相结合, 以获得土坡稳定性分析的可靠信息.

### [参考文献]

- [1] 钱家欢. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1996.
- [2] 史宏彦. 秦岭发电厂灰场加高工程抗液化稳定性分析[J]. 西北水资源与水工程 1994, 5(1): 38—46.
- [3] Yang H, Huang. 土坡稳定性分析[M]. 包承纲等译. 北京: 清华大学出版社, 1998. 123—125.
- [4] 江见鲸. 土建工程常用微机程序汇编[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1987. 167.
- [5] 杨菊生. 有限元法程序设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990. 211—212.
- [6] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987. 26—27.

## FINITE ELEMENT-SLIP SURFACE METHOD FOR ANALYSIS OF SLOP STABILITY TO EARTHQUAKE

SHI Hong-yan<sup>1</sup>, XIE Ding-yi<sup>2</sup>

(1. *Shantou University, Shantou 515063, China;*

2. *Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

**Abstract:** A new method for analysis of slop stability to earthquake is presented. The method combines finite element method (FEM) with traditional slip surface method, and is divided into two steps: first, based on the FEM, the effective stresses in slop are determined by solving dynamic equilibrium equation at some time; second, determining the most dangerous slip surface and its factor of safety at this time by using the effective stresses calculated in the preceding step. The method not only can consider behavior of stress-strain of soil, but also can determine the most dangerous slip surface and its factor of safety at any time. The detailed algorithm of the method is also given.

**Key words:** Slope; Stability to earthquake; Finite element-slip surface method; Factor of safety