

文章编号: 1000-7598(2012)06-1787-08

地震荷载作用下土钉支护边坡稳定性拟静力分析

邓东平, 李 亮, 罗 伟

(中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 在极限平衡分析框架内, 使用滑动面搜索新方法和圆弧滑动面方法对地震作用下的土钉支护边坡进行稳定性分析。考虑地震作用时, 采用拟静力分析方法, 并根据不同的条分模式, 推导出水平地震动态分布系数的计算公式。针对地震效应下圆弧滑动面竖条分法的不足, 采用水平和竖条分法相结合的改进方式。通过算例对比分析, 并研究土钉支护间距与不同地震烈度条件下土钉长度的变化对边坡静力和动力稳定性的影响, 结果表明, 滑动面搜索新方法计算得的最小安全系数与圆弧滑动面方法的计算结果颇为接近, 且比以往研究成果要小, 可说明滑动面搜索新方法的可行性; 在土钉支护边坡的静力和动力稳定性分析中, 滑动面搜索新方法计算得的临界滑动面与临界圆弧滑动面接近, 但表现出非圆弧特性; 在一定程度上可减小土钉支护间距和增大土钉长度, 可有效地改善土钉支护边坡在地震作用下的稳定性。

关 键 词: 边坡稳定性分析; 土钉; 地震作用; 拟静力法; 曲线滑动面; 圆弧滑动面; 安全系数

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Stability analysis of slope protected by soil nailing under earthquake loads based on pseudo static method

DENG Dong-ping, LI Liang, LUO Wei

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In the framework of limit equilibrium analysis, stability of slope protected by soil nailing is analyzed by using a new method of searching for sliding surface and circular sliding surface method. When considering earthquake, pseudo static method is adopted. Then, according to different modes of slice, a formula of calculating dynamic distribution coefficient of horizontal seism is derived. Aiming at the shortage of vertical slice method of circular sliding surface under earthquake, the mode of combining horizontal slice method with vertical slice method is used. Through analyzing examples and studying the effect of space change of soil nailing and length of soil nailing under different earthquake intensities on the static and dynamic stabilities of slope protected by soil nailing, some conclusions are obtained. The minimum factor of safety (FOS) calculated by new method is quite close to that calculated by circular sliding surface method, and is also smaller than previous results, so it shows that the new method of searching for sliding surface is feasible. In analyzing the static and dynamic stabilities of slope protected by soil nailing, the critical sliding surfaces got by the new method is close to the those got by critical circular sliding surfaces, but they perform the characteristics of non-circular feature. Reducing space of soil nailing and increasing length of soil nailing to a certain degree can effectively improve stability of slope protected by soil nailing under earthquake.

Key words: stability analysis of slope; soil nailing; earthquake; pseudo static method; curved sliding surface; circular sliding surface; safety factor

1 引 言

由于边坡失稳而产生的滑坡能够造成巨大的财产损失和人员伤亡, 且滑坡受地震的影响突出^[1], 因此, 自然斜坡和人工边坡的稳定性分析一直是岩土工程界所关注的问题^[2], 特别是针对动力条件下

的稳定性分析。近些年来, 由于高速铁路和高速公路建设的快速发展, 必然会存在着大量边坡的处治^[3]。在边坡处治方法中, 通常采用一定的加固措施, 其方式有: 土钉支护、锚索、抗滑桩等。其中, 土钉支护作为边坡抗震加固的一种简便有效的方法, 克服了传统边坡支护结构的一些缺点, 如: 受

收稿日期: 2011-01-07

基金项目: 西部交通建设科技项目(No. 2006318802111); 贵州省交通运输厅科技项目(No. 2010-122-020); 铁道部科技研究开发计划重点资助项目(No.2008G032-3); 湖南省交通厅科技项目(No. 2007-29)。

第一作者简介: 邓东平, 男, 1985年生, 博士研究生, 主要从事道路与铁道工程方面的研究。E-mail: dengdp851112@126.com

支护高度限制、造价高、笨重、稳定性差等,同时,具有对边坡的扰动小、使用经济安全的优势^[1]。因此,土钉支护得到了广泛应用^[4],在边坡工程中发挥了极大的作用。

在土钉支护边坡的动力特性方面,文献[1, 5—6]分别采用极限平衡和有限元方法进行了分析,文献[4]通过离心模型试验对其进行了研究。但土钉支护边坡仍然缺乏在地震动力方面的系统而深入的研究,对于土钉支护边坡在地震作用条件下的边坡失稳机制也尚不十分明确,所以仍需开展更深入的研究^[1]。同时,对土钉支护边坡在地震作用下的稳定性分析,以往研究成果大都基于圆弧滑动面方法^[1, 5],因而存在着一些不足。

本文基于滑动面搜索新方法和圆弧滑动面方法,在极限平衡领域内,对土钉支护边坡进行了动力稳定性分析。考虑地震作用时,按照规范所采用的拟静力分析方法,将其简化为作用在土条形心上的一个水平力和一个竖直力。同时,推导出了适用于水平条分法和竖直条分法的水平地震动态分布系数的计算公式。为了弥补圆弧滑动面竖直条分法在地震稳定性分析中的不足,采用了水平条分法和竖直条分法相结合的改进方式。其后,通过算例对比分析,验证了滑动面搜索新方法的可行性,并分别研究了土钉支护间距与不同地震烈度条件下土钉长度对边坡静力和动力稳定性的影响。

2 地震荷载作用

施加地震荷载时,通常采用的是规范建议的拟静力法,即在每个条分体重心处施加一个地震力,然后,对应不同的设防烈度,采用相应的 x 和 y 方向分量^[1, 7]。

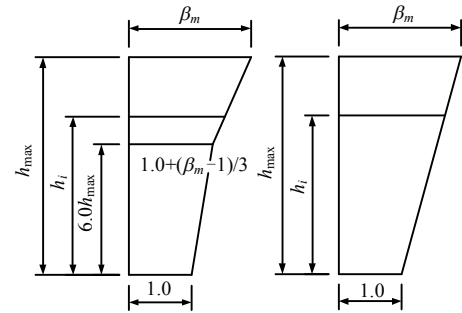
具体做法如下:

(1) 沿边坡高度作用于土条 i 重心处的水平向地震惯性力代表值按计算公式为

$$F_{Hi} = a_h \xi W_i \beta_i / g \quad (1)$$

式中: F_{Hi} 为土条 i 重心处的水平向地震惯性力的代表值; a_h 为水平向设计地震加速度的代表值; ξ 为地震作用的效应折减系数,一般取0.25^[8]; W_i 为集中在土条 i 重心处的重力作用标准值; β_i 为土条 i 重心处的动态分布系数; g 为重力加速度。

(2) 土条 i 重心处的动态分布系数 β_i 随其高度位置的不同而不同,且采用图1所示的计算方式,需说明的是:本文设坡脚点为原点, $h_{\max}$ 为坡高, β_m 为坡高处的动态分布系数, h_i 土条 i 重心处的高度,与图2中的 y_i 相对应,当 $h_i < 0$ 时, $\beta_i = 1.0$ ^[7]。



(a) 坡高>40 m (b) 坡高≤40 m

图1 水平地震动态分布系数

Fig.1 Dynamic distribution coefficient of horizontal seism

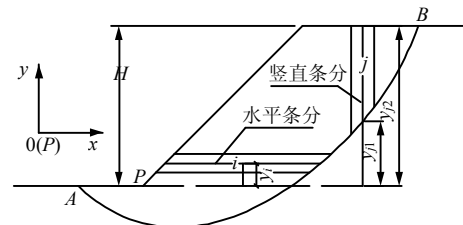


图2 不同条分时水平地震动态分布系数的取值

Fig.2 Value of dynamic distribution coefficient of horizontal seism with different modes of slice

如图2所示,水平地震动态分布系数 β_i 的取值如下:

当 $H \leq 40$ m时

①水平条分时,其计算公式为

$$\beta_i = 1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{y_i}{H} \quad (2)$$

上式需满足: $y_i \geq 0$;当 $y_i < 0$ 时,取 $y_i = 0$ 。

②竖直条分时,其计算公式为

$$\beta_i = \begin{cases} \frac{|y_{j1}| + y_{j2} \left[1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{y_{j2}}{2H} \right]}{|y_{j1}| + y_{j2}} & (y_{j1} < 0) \\ 1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{y_{j1} + y_{j2}}{2H} & (y_{j1} \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

当 $H > 40$ m时,

①水平条分时,其计算公式为

$$\beta_i = \begin{cases} 1.0 & (y_i < 0) \\ 1.0 + \frac{5(\beta_m - 1)}{9} \frac{y_i}{H} & (0 \leq y_i < 0.6H) \\ \beta_m + \frac{5(\beta_m - 1)}{3} \frac{(y_i - H)}{H} & (y_i \geq 0.6H) \end{cases} \quad (4)$$

② 竖直条分时, 其计算公式如式 (5)。

(3) a_h 在设计烈度为 VII~IX 度时分别取 0.1 g, 0.2 g, 0.4 g^[3, 8]。

(4) 作用于土条 i 重心处的竖直向地震惯性力

$$\beta_i = \begin{cases} \frac{|y_{j1}| + y_{j2} \left[1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{5y_{j2}}{18H} \right]}{|y_{j1}| + y_{j2}} & (y_{j1} < 0, y_{j2} < 0.6H) \\ \frac{|y_{j1}| + 0.6H \left[1.0 + \frac{(\beta_m - 1.0)}{2} \right] + (y_{j2} - 0.6H) \left[1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{(5y_{j2} - H)}{6H} \right]}{|y_{j1}| + y_{j2}} & (y_{j1} < 0, y_{j2} \geq 0.6H) \\ 1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{5(y_{j1} + y_{j2})}{18H} & (0 < y_{j1} < 0.6H, y_{j2} < 0.6H) \\ \frac{(0.6H - y_{j1}) \left[1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{5(y_{j1} + 0.6H)}{18H} \right] + (y_{j2} - 0.6H) \left[1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{(5y_{j2} - H)}{6H} \right]}{y_{j2} - y_{j1}} & (0 < y_{j1} < 0.6H, y_{j2} \geq 0.6H) \\ 1.0 + (\beta_m - 1.0) \frac{[5(y_{j1} + y_{j2}) + 2H]}{6H} & (y_{j1} \geq 0.6H, y_{j2} \geq 0.6H) \end{cases} \quad (5)$$

3 滑动面生成与搜索及安全系数计算

3.1 滑动面搜索新方法及安全系数的计算

3.1.1 滑动面的生成

如图 3 所示, A 、 B 为假想滑动面与边坡上、下缘的交点, 假设一个过 A 点的初始方向 AC , 终止方向为 AB , α_1 为初始角, α_2 为终止角 (α_1 、 α_2 分别为初始方向 AC 、终止方向 AB 与边坡下缘水平延长线之间的夹角, α_1 在边坡下缘线延长线以下为正, α_2 与之相反)。

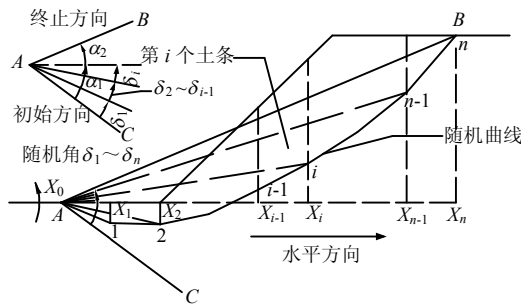


图 3 二维随机滑动面生成基本要素

Fig.3 Basic elements of generated two-dimensional sliding surface randomly

随机滑动面生成和搜索过程: 如图 3 所示, 从一个假定的初始方向 ($-\alpha_2 \leq \alpha_1 \leq 45^\circ$ ^[10], 注: 此式为一般情况, 但可适当放宽到 $\alpha_1 \leq 90^\circ$) AC 逆时针旋转到终止方向 AB 随机产生 n 个角 (或角方向); 将 AB 之间的土体也划分为 n 个土条 (当角度随机

代表值 F_{Vi} 取 F_{Hi} 的 $1/3$ ^[8]。同时, 当 F_{Vi} 与土条重力方向相同时, 取为正, 与之相反时, 取为负;

(5) β_m 可适当取值, 但建议在设计烈度为 VII~IX 度时分别取 3、2.5、2^[3, 9]。

时, 土条等不等分影响不大, 故而在采用简单的等分土条), 设第 i 个土条与边坡下缘线的水平延长线的交点按顺序为 X_{i-1} , X_i ; 设第 i 个随机角 (或随机方向) 与点 X_i 的竖直线交点为 i , 依次连接这些交点即可形成一条随机曲线。

3.1.2 滑动面的近似曲线简化生成与搜索

将角度随机转化为一定条件下的土条和角度划分来实现近似曲线代替随机曲线。这种做法可以做到: ①变动的近似曲线能像随机曲线一样模拟任何曲线, 但它搜索滑动面的过程又不是随机过程; ②没有对曲线的模拟范围减小, 但它对随机搜索精度不高进行了改进。

近似曲线的构造方式有很多种, 在此将近似曲线生成进行简化, 其过程如下:

① 设初始角度为 δ , 增量为 ϕ , 则第 i 个旋转角为 $\delta + (i-1)\phi$;

② 设初始土条宽度为 x , 增量为 a , 则第 i 个土条宽度为 $x - (i-1)a$;

③ 取 $\delta = \phi$, 则第 i 个旋转角为 $i\phi$, 其中 $\phi = 2(\alpha_1 + \alpha_2)/[n(n+1)]$, α_1 为初始角, α_2 为终止角;

④ 设 A 、 B 两点连线的水平投影为 l , 将初始土条宽度 x ($x = l/n + \Delta x$, 其中 Δx 为可变微量) 作为未知数, n 为土条划分数, 则 $a = 2(nx - l)/[n(n-1)]$ 。当 Δx 变化时, 构造的近似曲线也会随着变化。

⑤ 保证第 1 个土条宽度和最后 1 个土条宽度不

为 0, 即 $x > 0$ 和 $x - (n-1)a > 0$, 这样 x 就需满足 $0 < x < 2l/n$ 。

因此, 这样的二维曲线滑动面就可以通过对 A 、 B 点位置、初始角 α_1 、初始土条宽度 x ($x = l/n + \Delta x$) 这 4 个参数选区间对二维临界滑动面进行搜索。(需说明的是: 终止角 α_2 可以通过 A 、 B 点位置和坡体几何参数计算得到。)

尽管对近似曲线进行了简化, 但当土条数一定大时, 它并不会削弱对任何曲线的模拟, 只不过是对曲线的逼真度稍有影响^[11]。

3.1.3 安全系数 F_s 的计算

如图 4 所示, 由于 Janbu 法能够适用于任意形状滑动面的安全系数的计算, 故本文对任意曲线滑动面下的土钉支护边坡的安全系数计算采用简化 Janbu 法, 其计算公式为

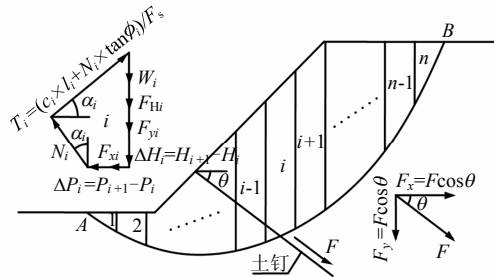


图 4 土钉支护时 Janbu 条分法的计算模型

Fig.4 Calculation model of Janbu slice method in slope protected by soil nailing

$$F_s = \left\{ \sum_{i=1}^n \left\{ [cb_i + (W_i - F_{Vi}) \tan \varphi] / m_{\theta i} \right\} + \sum_{j=1}^m \left[(F_j / S) \sin \theta_j \tan \varphi / m_{\theta i} \right] \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^n [(W_i - F_{Vi}) \tan \alpha_i + F_{Hi}] + \sum_{j=1}^m [(F_j / S) (\sin \theta_j \tan \alpha_j - \cos \theta_j)] \right\} \quad (6)$$

$$m_{\theta i} = \cos^2 \alpha_i + \frac{\cos \alpha_i \sin \alpha_i \tan \varphi}{F_s} \quad (7)$$

式中: F_s 为边坡稳定安全系数; n 为土条数; m 为土钉支护数; W_i 为土条 i 的重量; θ_i 为土条 i 底面曲线中心点切线夹角; b_i 为土条 i 的宽度; c 为土条 i 底面上土的黏聚力; φ 为土条 i 底面上土的内摩擦角; F_j 为土钉 j 的极限抗拉力; θ_j 为土钉 j 的倾角; S 为土钉支护间距; F_{Hi} 、 F_{Vi} 分别为作用在第 i 分条块重心处的水平向和竖直向地震惯性力代表值, 其计算详见第 2 节。

其中, 需说明的是本文假设地震作用对土体强度的改变忽略不计, 且土钉对边坡稳定性的作用只

考虑拉力。在地震作用下土钉支护边坡达到极限滑移状态时, 考虑土钉支护发生的破坏存在两种可能:

①土钉被拔出, 其计算公式为: $F = \pi d_2 \sum u_{ki} l_i$, 式中 F 为土钉的极限抗拉力, d_2 为土钉锚固体的直径, u_{ki} 、 l_i 分别为土钉经过 i 层土时土钉与土层的极限摩阻力和长度; ②土钉发生屈服或被拉断, 其计算公式为: $F = f_y d_1$, f_y 为土钉钢筋的屈服强度, d_1 为土钉钢筋的直径。

3.2 圆弧滑动面搜索方法及安全系数的计算

3.2.1 圆弧滑动面的搜索

如图 5 所示, 以 A 点 (X_A)、 B 点 (X_B) 和圆弧半径 R 这 3 个量为参数对临界圆弧滑动面进行搜索^[12]。设 A 点坐标为 (X_A , h_A), B 点坐标为 ($H/\tan \beta + X_B$, h_B), 在图 5 中时 (以坡脚点 P_b 为原点), 有 $h_A = 0$, $h_B = H$ 。其中, 当 A 点在坡脚点 P_b 左边时为负, 右边时为正; 当 B 点在坡顶点 P_t 左边时为负, 右边时为正。

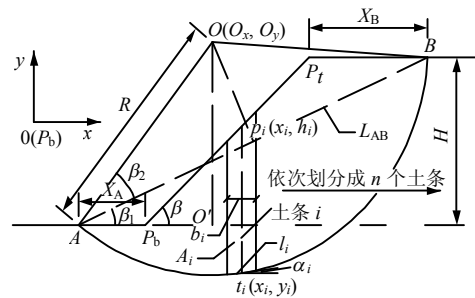


图 5 圆弧滑动面计算模型

Fig.5 Calculation model of circular sliding surface

从图 5 可知, 存在下列关系式:

$$\left. \begin{aligned} L_{AB} &= \sqrt{(H/\tan \beta + X_B - X_A)^2 + (h_B - h_A)^2} \\ \beta_1 &= \arcsin(H/L_{AB}), \quad \beta_2 = \arccos[L_{AB}/(2R)] \\ O_x &= X_A + R \cos(\beta_1 + \beta_2) \\ O_y &= h_A + R \sin(\beta_1 + \beta_2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: (O_x , O_y) 为滑动圆弧的圆心坐标; L_{AB} 为滑动上、下滑动点 A 、 B 的连线长度; β_1 为 AB 与水平方向的夹角; β_2 为 OA 与 AB 之间的夹角。

则对于土条 i 可知有

$$\left. \begin{aligned} x_i &= X_A + (i - 0.5)b, y_i = O_y - \sqrt{R^2 - (x_i - O_x)^2} \\ \alpha_i &= \arcsin[(x_i - O_x)/R] \\ l_i &= Rb/\sqrt{R^2 - (x_i - O_x)^2}, A_i = b(h_i - y_i) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: (x_i , y_i) 为土条 i 底面中心点的坐标; α_i 为土条 i 底面中心点切线方向与水平方向的交角; l_i 为土条 i 底面长度; A_i 为土条 i 的面积。

根据上述公式, 即可得到条分法中的各未知项。

3.2.2 安全系数 F_s 的计算

对于假定临界滑动面为圆弧滑动面时, 本文采用文献[8]所适用的瑞典法, 其计算公式为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ cl_i + [(W_i - F_{Vi}) \cos \alpha_i - F_{Hi} \sin \alpha_i] \tan \varphi \right\} + \sum_{j=1}^m \left\{ (F_j / S) [\sin(\alpha_j + \theta_j) \tan \varphi + \cos(\alpha_j + \theta_j)] \right\}}{\sum_{i=1}^n [(W_i - F_{Vi}) \sin \alpha_i + F_{Hi} \cos \alpha_i]} \quad (10)$$

式中各符号的意义与 3.1.3 节相同。

如图 6 所示, 水平地震惯性力作用在土条形心, 不能向下移置于该土条的底面, 只能沿着水平线作用到其他土条的滑面上^[1]。即: 在图 6 中, 设土条 i 的底面中点为 C , 但水平地震力 F_{Hi} 的作用线与滑面的交点为 D , 它影响点 D 处滑面上的法向力和抗剪强度, 而传统的方法是将其与竖向力一样放在 C 点计算抗滑力矩, 使 α_i 被减小, 显然是不合理的。同时, 文献[8]认为: 由于地面以下弓形体上的地震力引起了相对较大的滑动力矩, 而在竖直条分法中可能导致计算失真。因此, 需要对以上竖直条分中出现的缺点进行改进。目前, 普遍的做法是将水平地震力的作用按水平条分法进行计算 (在图 6 中, 将 F_{Hi} 作用在土条 i 上), 竖直地震力的作用按竖直条分法进行计算, 然后将水平地震力和竖向力对滑动力矩和抗滑力矩的作用进行线性叠加^[1, 8]。

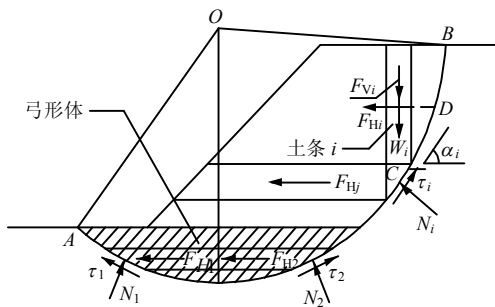


图 6 水平和竖直条分法结合模式
Fig.6 Binding mode of horizontal and vertical slice method

在图 6 中, 弓形体上的水平地震力对抗滑力的影响可不考虑。因为该力与滑动面有 2 个交点, 对前方交点, 增加了滑面法向力, 从而增加了抗滑力; 对后方交点, 则减小了抗滑力。而 2 个交点又对过圆心的竖向线对称, 即 α 角相等但相反, 故引起的抗滑力矩相等且相反, 其结果是相互抵消。因此, 安全系数计算公式中只需考虑底面以上的水平地震力 F_{Hi} 。

4 计算对比与分析

4.1 算例分析

参考文献[1], 边坡坡高 $H=14.18$ m, 坡角 $\beta=65^\circ$, 边坡土层重度 $\gamma=16$ kN/m³, 黏聚力 $c=15$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=28^\circ$ 。土钉与土层的极限摩阻力 $u_k=50$ kN/m², 与水平面夹角 $\theta=10^\circ$, 其中钢筋直径 $\phi_1=25$ mm。同时, 边坡所处抗震设防烈度为 VIII 度, 水平地震加速度值 $a_h=0.2g$ 。

在算例中, 考虑了两种情况, 第 1 种情况是土钉布置方式如图 7 所示, 锚固体直径 $\phi_2=100$ mm; 第 2 种情况是土钉布置方式如图 8 所示, 锚固体直径 $\phi_2=150$ mm。同时, 本文还研究土钉支护间距 S 对土钉支护边坡稳定性进的影响。对于第 1 种情况计算得的最小安全系数见表 1, 得到的临界滑动面如图 9 所示; 对于第 2 种情况计算得的最小安全系数见表 1, 得到的临界滑动面如图 10 所示。

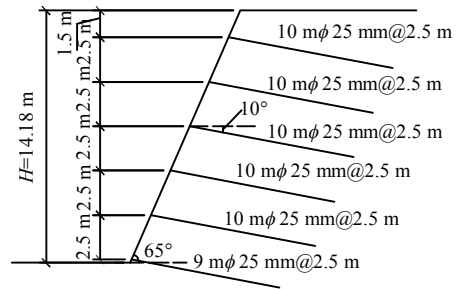


图 7 土钉支护边坡算例 1
Fig.7 Example 1 of slope protected by soil nailing

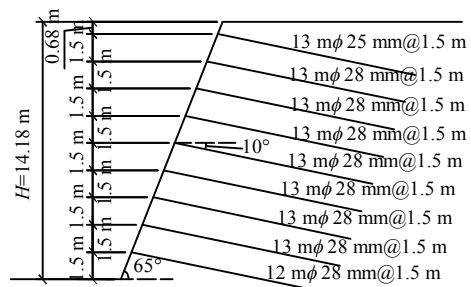


图 8 土钉支护边坡算例 2
Fig.8 Example 2 of slope protected by soil nailing

从表 1 可知, 当土钉支护水平间距 $S=2.5$ m 时, 静力效应中滑动面搜索新方法和圆弧滑动面方法计算得的最小安全系数分别为 1.101 和 1.132, 而文献[1]给出的值为 1.43, 相比之, 本文方法较小, 其原因在于文献[1]中将圆弧滑动面的下滑点限定在坡脚点, 而与最小安全系数相对应的实际临界滑动面的下滑点并没有在坡脚点, 因而, 最下面一排土钉并没有起到支护作用; 动力效应中滑动面搜索新方法和圆弧滑动面方法计算得的最小安全系数分别为

0.948/0.969 和 0.984/1.009 (注明: 动力效应时, 根据竖向地震力取值方向的不同可计算得 2 个安全系数值, “/”的左边值为当其取负时、右边值为当其取正时, 正负规定与第 2 节相同。), 文献[3]在没有考虑竖向地震力的影响下计算得出的安全系数值为 0.988, 而当本文方法在未考虑竖向地震力影响时, 其计算得的最小安全系数应在上述这 2 个值之间, 因而, 本文方法相比与之非常接近。

从表 1 可知, 当土钉支护水平间距 $S=1.5$ m 时, 动力效应中滑动面搜索新方法和圆弧滑动面方法计算得的最小安全系数分别为 1.209/1.228 和 1.335/1.358, 同样, 文献[1]在没有考虑竖向地震力的影响下计算得出的安全系数值为 1.398, 而本文方法在未考虑竖向地震力影响时, 其值相比较小, 其原因也是由于文献[1]将圆弧滑动面的下滑点限定在坡脚点, 而实际上与最小安全系数相对应的实际临界滑动面的下滑点离坡脚点有一定距离。

同时, 通过上述这两种情况, 来研究土钉支护间距 S 对土钉支护边坡稳定性进的影响来看: ①随着土钉支护水平间距 S 的减小, 计算得的最小安全系数逐渐增大, 说明减小土钉支护间距 S , 可对边坡的稳定性产生积极影响; ②滑动面搜索新方法计算得的最小安全系数较圆弧滑动面方法要略小, 可证明滑动面搜索新方法的可行性, 而对应圆弧滑动面的局限性, 滑动面搜索新方法相比更具有优越性。

表 1 土钉支护边坡算例中静力和动力效应时的最小安全系数

Table 1 The minimum FOS in example 1 of slope protected by soil nailing under static and dynamic effects

算例	土钉支护间距 S /m	静力效应		动力效应	
		滑动面搜索新方法	圆弧滑动面方法	滑动面搜索新方法	圆弧滑动面方法
第 1 种情况	1	1.264	1.313	1.078/1.059	1.138/1.117
	1.5	1.197	1.234	1.033/1.009	1.084/1.062
	2	1.144	1.175	0.995/0.973	1.042/1.018
	2.5	1.101	1.132	0.969/0.948	1.009/0.984
	未支护	0.871	0.891	0.778/0.757	0.799/0.778
第 2 种情况	1	1.451	1.565	1.251/1.233	1.388/1.365
	1.5	1.425	1.540	1.228/1.209	1.358/1.335
	2	1.404	1.519	1.209/1.190	1.333/1.311
	2.5	1.388	1.503	1.193/1.175	1.313/1.291
	未支护	0.871	0.891	0.778/0.757	0.799/0.778

从图 9、10 可知, 滑动面搜索新方法得到的曲线滑动面与临界圆弧滑动面相接近, 但在土钉支护时, 滑动面搜索新方法得到的曲线滑动面呈现出非圆性, 因而, 较圆弧滑动面的局限性, 本文滑动面搜索新方法更具有优越性。同时, 从图 9 可以看出, 随着土钉支护间距 S 的减小, 临界滑动面的范围(即边坡失稳范围)变大。从图 10 可以看出: ①与圆弧

滑动面相比曲线滑动面在坡脚点向外的凌空段要长; ②随着土钉支护间距 S 的减小, 临界滑动面的范围变大, 但变化不显著, 可说明当土钉支护加密到一定程度时, 土钉支护间距 S 的减小对临界滑动面的影响较小。

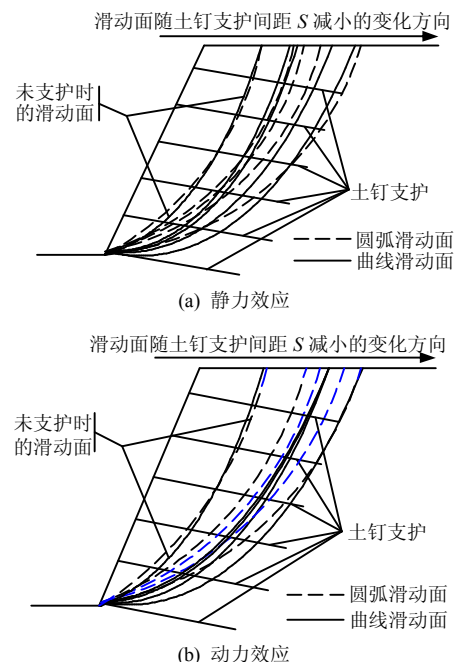


图 9 土钉支护边坡算例第 1 种情况的临界滑动面
Fig.9 The critical sliding surface in example 1 of slope protected by soil nailing

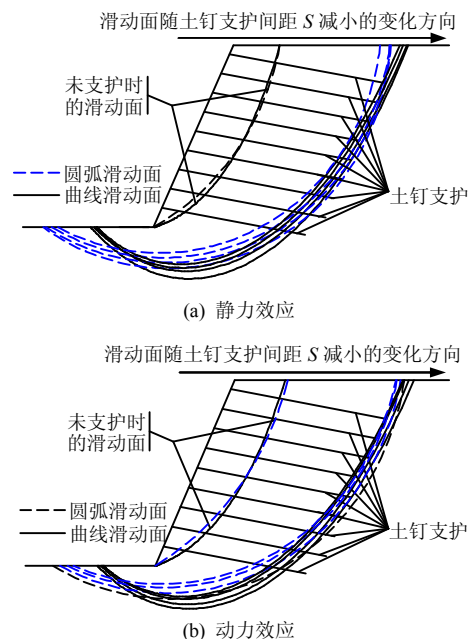


图 10 土钉支护边坡算例第 2 种情况的临界滑动面
Fig.10 The critical sliding surface in example 2 of slope protected by soil nailing

4.2 不同地震效应对土钉支护边坡稳定性的影响

边坡坡高 $H=12$ m, 坡角 $\beta=80^\circ$, 边坡土层参

数 $\gamma=18.5 \text{ kN/m}^3$, $c=22 \text{ kPa}$, $\varphi=25^\circ$ 。土钉与土层的极限摩阻力 $u_k=52 \text{ kN/m}^2$, 与水平面夹角 $\theta=15^\circ$, 土钉钢筋直径 $\phi_1=25 \text{ mm}$, 锚固体直径 $\phi_2=120 \text{ mm}$, 土钉支护布置如图 11 所示。

设定土钉长度 L 与边坡坡高 H 之比 (L/H) 为 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0, 且抗震设防烈度为 VII~IX 度, 研究地震效应对土钉支护边坡稳定性的影响。计算得的最小安全系数见表 2, 得到的临界滑动面如图 12 所示。

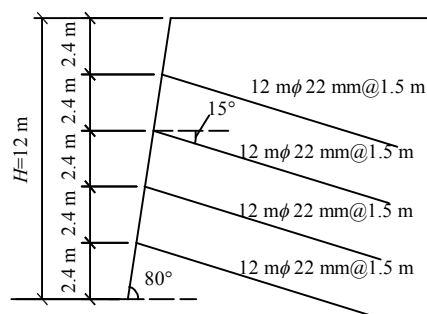


图 11 土钉支护边坡算例 3

Fig.11 Example.2 of slope protected by soil nailing

表 2 不同地震烈度条件下 L/H 之比变化时的最小安全系数

Table 2 The minimum FOS with change of ratio of length of soil nailing (L) and slope height (H) under different earthquake intensities

(1) 不同抗震设防烈度																
效应方法		L/H														
		0.6			0.7			0.8			0.9			1.0		
								抗震设防烈度/度								
		VII	VIII	IX	VII	VIII	IX	VII	VIII	IX	VII	VIII	IX	VII	VIII	IX
动力效应	滑动面搜索新方法	0.997	0.943	0.859	1.068	1.009	0.917	1.143	1.078	0.978	1.223	1.151	1.040	1.307	1.229	1.106
		0.976	0.913	0.824	1.044	0.975	0.878	1.116	1.040	0.933	1.192	1.108	0.992	1.272	1.180	1.052
	圆弧滑动面方法	1.007	0.960	0.886	1.072	1.024	0.943	1.138	1.087	1.001	1.203	1.149	1.059	1.267	1.211	1.116
		0.987	0.932	0.850	1.051	0.992	0.905	1.114	1.052	0.960	1.177	1.112	1.015	1.240	1.171	1.068
静力效应	滑动面搜索新方法	1.073			1.152			1.235			1.323			1.416		
	圆弧滑动面方法	1.068			1.136			1.204			1.272			1.339		

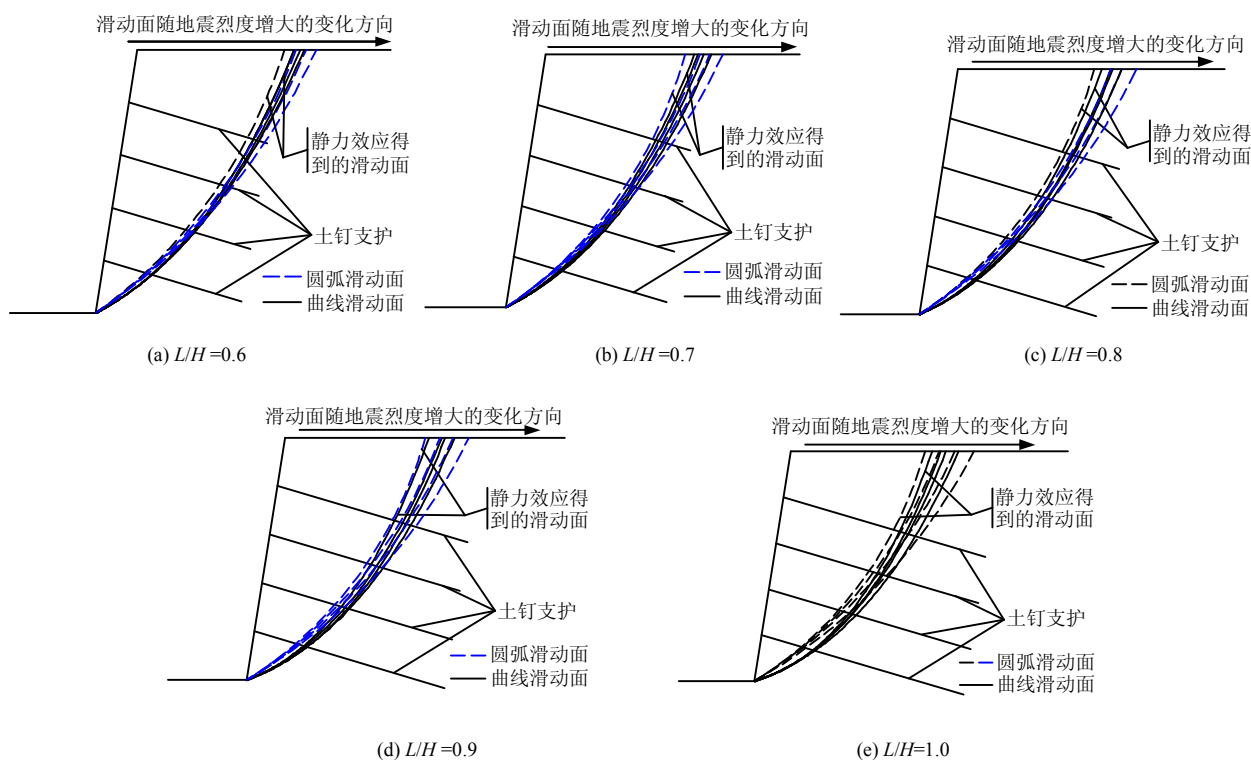


图 12 不同情况时的临界滑动面

Fig.12 The critical sliding surfaces in different conditions

从表 2 可知, ①随着土钉 L/H 从 0.6 到 1.0 逐渐增大时, 边坡的稳定性得到了明显改善; ②当 L/H 之比固定时, 随着地震烈度的增大, 动力效应对边

坡的稳定性影响越明显; ③在此例中, 滑动面搜索新方法计算得到的最小安全系数与圆弧滑动面方法颇为接近, 因而, 也验证了其的适用性。同时, 需

说明的是:由于滑动面搜索新方法和圆弧滑动面方法在计算安全系数时所采用的方法不同,以及计算精度的问题,必然会对两者计算得到的最小安全系数产生影响。(注明:动力效应时,根据竖向地震力取值方向的不同可计算得2个安全系数值,表中上面值为当其取负时,下面值当其取正时,正负规定与上述相同。)

从图12可知:①滑动面搜索新方法得到的曲线滑动面与临界圆弧滑动面相接近;②随着地震烈度、土钉长度 L 与边坡坡高 H 之比的增大,得到的临界滑动面的范围变大,但变化不十分显著。

5 结 论

(1) 经过算例对比分析,滑动面搜索新方法与圆弧滑动面方法计算得的最小安全系数颇为接近,且相比以往研究结果要小,因而,可说明滑动面搜索新方法在土钉支护边坡稳定性分析中的可行性;

(2) 在土钉支护边坡的静力和动力稳定性分析中,相比圆弧滑动面方法,滑动面搜索新方法计算得的最小安全系数要较小,得到的临界滑动面与临界圆弧滑动面相接近,但表现出非圆弧性,因而,相比圆弧滑动面方法的局限性,滑动面搜索新方法更具有优越性;

(3) 随着土钉支护间距 S 的减小与钉长度 L 的逐渐增大,计算得的最小安全系数逐渐增大,且临界滑动面的范围也在变大。因而,说明在一定程度上减小土钉支护间距 S 和增大土钉长度 L ,可有效地改善土钉支护边坡在地震作用下的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 董建华, 朱彦鹏. 地震作用下土钉支护边坡稳定性计算方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(3): 119—204.
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng. Stability calculation method of a soil side-slope protected by soil nailing under earthquake[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(3): 119—204.
- [2] 陈昌富, 杨宇, 龚晓南. 基于遗传算法地震荷载作用下边坡稳定性分析水平条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1919—1923.
CHEN Chang-fu, YANG Yu, GONG Xiao-nan. Horizontal slice method of slope stability analysis under seismic load based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1919—1923.
- [3] 王志斌, 李亮, 杨小礼, 等. 水平条分法在贴坡高填方路堤稳定性分析中的应用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 29—34.
WANG Zhi-bin, LI Liang, YANG Xiao-li, et al. Application of horizontal slice method in stability analysis of high fill embankments at slope[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(3): 29—34.
- [4] 王丽萍, 张嘎, 张建民. 土钉加固黏性土坡动力离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1226—1230.
WANG Li-ping, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Dynamic centrifuge modeling test of cohesive soil slopes reinforced with soil nailing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1226—1230.
- [5] 董建华, 朱彦鹏. 地震作用下土钉支护边坡稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 20—25.
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng. Stability analysis of slope supported by soil nailing retaining wall under earthquake[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(6): 20—25.
- [6] 朱彦鹏, 董建华. 土钉支护边坡动力模型的建立及地震响应分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1013—1022.
ZHU Yan-peng, DONG Jian-hua. Dynamic calculation model and seismic response for slope protected by soil nailing under earthquake[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1013—1022.
- [7] 中华人民共和国行业标准. SL203—97 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [8] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [9] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [10] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [11] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 基于 Janbu 法的边坡整体稳定性滑动面搜索新方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 891—898.
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. A new method of sliding surface searching for general stability of slope based on Janbu method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 891—898.
- [12] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. Excel 在边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(6): 304—308.
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. The application of Excel in slope stability analysis[J].

Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(6): 304

—308.