

侧翼锁固平面旋转式滑坡动力学机理分析*

程谦恭 胡厚田

(西南交通大学地质工程系 成都 610031)

彭建兵

(长安大学 西安 710054)

摘要 侧翼锁固平面旋转式滑坡变形模式可以概化为横向均布荷载与轴向受压组合变形的悬臂梁模型。基于 Rayleigh-Ritz 能量法,建立了含裂缝悬臂梁的弹性挠度-荷载曲线方程,利用断裂力学中的应力强度因子破坏准则确定悬臂梁极限承载力,导出滑坡稳定系数的解析公式,从而在理论上定量地论证了这类滑坡的动力学机理及稳定性判据。

关键词 滑坡, 平面旋转, 动力学, 稳定性

分类号 TV 698.2⁺32

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2000)05-0634-06

1 引言

高陡边坡上发育的滑坡体,在其渐进性破坏过程中,常常可以看到在平面上滑坡体并非总是在其整个范围内与边坡稳定岩体完全脱离,往往沿着滑坡的一个侧翼保持联系。这时,滑坡移动在其对面一侧达到最大数值,并且造成整个滑坡体的不对称旋转。这种滑坡体绕垂直于稳定岩面(潜在滑面)的旋转轴的旋转运动,称之为“平面旋转”。秦岭北麓黑河引水枢纽工程高边坡上出现的滑坡体,呈现典型的侧翼锁固平面旋转式变形。本文就其动力学机理与稳定性判据进行分析研究。

2 滑坡原型及变形模式

2.1 滑坡几何特征及边界条件

滑坡体发育在切向层状岩体组成的高边坡(图1)。坡顶高程786m,坡底高程488m,相对高差约300m,坡度40°~50°。岩层由前震旦系云母石英片岩(S₁)、绿泥石片岩(S₂)等变质片岩组成,呈条带状延伸;倾向SW 185°~210°,与坡面倾向相交,倾角30°~45°。滑坡体平面形态呈不规则四边形,分布高程620~760m,南北宽120~150m,东西长200~250m,厚度15~30m;主轴方向SW 240°~245°;滑

坡体由以下变形边界所围限。

(1) 顺断层滑移、位移向深部消减的北侧边界。北侧边界已形成由地表发育的裂缝,并向深部与南倾高角度正断层贯通相连的侧向滑移面。滑坡体沿着断层上盘向南滑移,由地表向下,位移变形量逐渐减小。

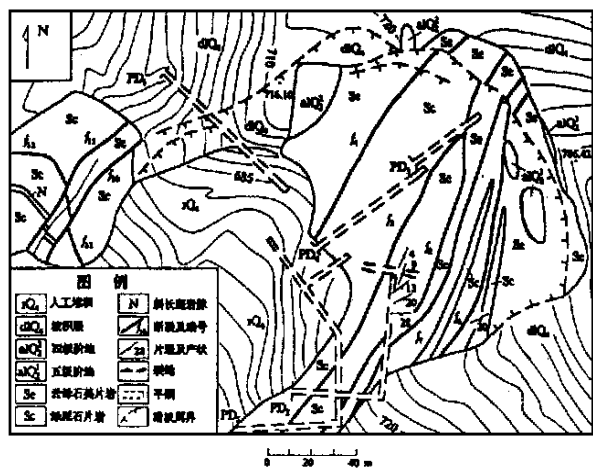


图1 滑坡工程地质图

Fig 1 Geological map of the landslide

(2) 张剪蠕动、顺坡滑移的后缘滑面。在滑坡体后缘775m高程处,地表为一条断续长度达400m的弧形裂缝,由上向下延伸,在760m高程探槽剖面

1999年4月12日收到初稿,1999年7月12日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(49872087)、中国博士后科学基金、国土资源部岩土工程开放实验室基金和西南交通大学科学研究基金(1999XM 16)资助项目。

作者 程谦恭 简介:男,1962年生,博士后,1997年于长安大学(原西安工程学院)地质工程系工程地质专业获博士学位,现任教授,主要从事滑坡动力学与岩土工程的科研工作。

上表现为倾向 SW 260°、倾角 58°、宽度 10~ 30 cm 的张剪夹泥带, 夹泥带的上下界面均有明显的沿倾向的滑动擦痕。

(3) 断层控制、连续蠕动的底部滑面。在滑坡体中部不同高程的平硐中, 均可见到走向近于南北, 倾向坡外的断层破碎带, 从上到下基本贯通, 构成滑坡体变形的底部滑面。断层破碎带底部连续分布有宽度 15~ 20 cm 的泥化带, 倾向的 SW 230°~ 260°; 倾角为 44°~ 48°。滑面上擦痕显示滑体向坡下蠕动滑移。

(4) 顶部拉裂、中部锁固的南侧边界。滑坡体南侧没有形成从上往下完全贯通的分割性界面。740 m 高程以上, 地表可见断续位错的线状裂缝; 740~ 700 m 高程为张裂隙发育段, 显示张裂变形。700~ 650 m 高程段, 为滑坡的锁固段, 坚硬的绿泥石片岩呈层状连续延伸; 670 m 高程平硐相应位置, 绿泥石片岩呈现整体块状结构, 结构面紧密闭合, 未见拉裂、剪切等变形破裂。650 m 高程平硐相应位置, 可见张裂缝, 呈上宽下窄楔形状, 其间由岩块充填并夹泥, 但两侧岩体无剪切错动迹象。

2.2 滑坡变形规律

(1) 南小北大顺层渐增变形。滑坡体变形量在横向上具有显著的南小北大特点。760 m 高程附近, 五级阶地砾石层顶面南高北低, 在 48 m 长度范围内, 由南端顶面高程 763.55 m, 向北逐渐降低至北端顶面高程 757.48 m, 相差 6.07 m。根据变形监测资料(图 2), 顺岩层延伸方向, 由南西端向北东端, A₅ 点位移矢量小于 B₂₂ 点, A₁ 点位移矢量小于 A₉ 点、B₁₂ 点。北东侧的 B₃₂、B₄₂ 点位移矢量大于南侧的 A₁ 点; 北侧 m₉、m₁₀、m₁₁ 点的变形大于南侧的 m₁₂ 点。

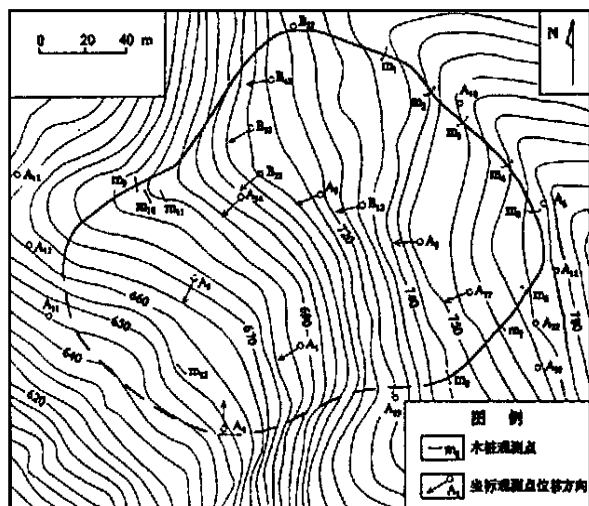


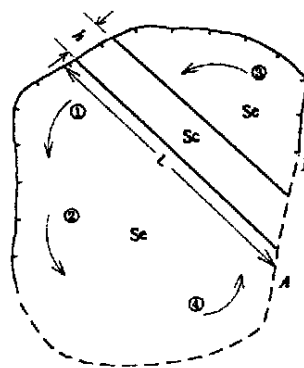
图 2 滑坡体位移矢量图

Fig 2 Displacement vectors of slide body

(2) 平面左旋转动变形。滑坡体不同部位, 不论是其变形量还是变形方向, 都呈现典型的左旋(逆时针)转动变形特点。南侧边界 760 m 高程处, 滑体位移方向 NW 296°; 倾角 73°; 后缘边界相应高程处, 滑面擦痕运动方向 NW 272°; 倾角 56°; 北界 680 m 高程处, 滑体位移方向 S 180°; 倾角 64°。从 B₄₂、B₃₂、B₂₂、A₁₀、A₅ 水准点, 平面位移方向由 SW 260°、SW 236°、SW 234°、SW 230°、SW 213°; 滑体下部南端 A₄ 点, 位移方向表现为与旋转变形相协调的垂直上升。同一水准点的位移方向, 随着滑坡渐进性变形, 从初始蠕变阶段至等速蠕变阶段, 也呈现出旋转特点。如 A₅ 点, 从 SW 213°、SW 209°; A₈: SW 268°、SW 256°; B₄₂: SW 260°、SW 249°。滑坡体内, 岩层片理倾角自南向北逐渐变缓, 也是旋转式变形特点的反映。

2.3 滑坡变形模式

滑坡体的边界特征及变形规律表明, 滑坡体表现为一种侧翼锁固的逆时针平面旋转变形, 它几乎就象是在固定于其南侧边界中部的“悬臂梁”似的平面上弯曲(图 3)。“悬臂梁”顺岩层的产状向坡体斜上方延伸, 在“悬臂梁”的弯曲部分, 滑动的位移面逐渐切断了层理面。滑体在“悬臂梁”的自由端(北东端)首先破裂, 然后逐渐转移到坡体上部和内部。坡体上部已经破裂的部分, 将以其全部自重下滑力施加在“悬臂梁”上, 促使其应力增大。在滑坡变形的同时, “悬臂梁”的挠度(位移)将逐渐增大, 当挠度和悬臂的长度达到临界值(由组成悬臂的岩层的强度所决定), 就发生沿固定端张裂缝的折断。由于滑体能量巨大, 除部分消耗于滑体平面转动之外, 还有剩余, 直至滑坡锁固端拉裂, 滑坡剧动剪出, 才能使能量全部释放。



AB—滑坡侧翼锁固段; ~—滑体破裂次序及位移方向; Sc—云母石英片岩; Sc—绿泥石片岩

图 3 滑坡变形模式

Fig 3 Displacement mode of the landslide

3 滑坡动力学机理及稳定性判据

3.1 悬臂梁计算模型

图 4 表示侧翼锁固平面旋转变形滑坡的“悬臂梁”模型。选定如图所示的坐标系，设梁的长度为 L ，横截面宽度为 b ，高度为 h ，自由端挠度为 δ ，轴向位移为 λ ，梁的轴线与水平面夹角（相当于岩层的倾角）为 α ，滑床面视倾角为 β （真倾角 β 在梁横截面上的投影角）。“悬臂梁”所受的力有：本身自重，上部岩体的推力，下部岩体的拉力及滑床面上的抗剪强度。梁弯曲变形到一定程度时，固定端顶部出现的张裂缝，可用断裂力学中 I 型裂纹描述。上、下部分岩体的作用力可视为作用在梁纵向对称面的均布荷载 q ，其大小为

$$q = \frac{(lt - hL)[b\gamma_m(\sin\beta - \cos\beta\tan\varphi) - c]}{L} \quad (1)$$

式中： l ， t 分别为滑体平均长度及宽度； γ_m 为滑体（不包括悬臂梁）岩石的容重； c ， φ 分别为滑面的粘聚力和内摩擦角。 q 可分解为沿 x 方向的轴向分布力 q_x 和沿 y 方向的横向分布力 q_y ，其值可由下列公式计算：

$$\left. \begin{aligned} q_x &= q\sin\alpha \\ q_y &= q\cos\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于单位长度的梁，梁的自重 p 在垂直滑面方向的分力为 $p_z = p\cos\beta = \gamma_m bh\cos\beta$ ，沿滑面 (xoy 平面) 的分力 $p_{xy} = p\sin\beta = \gamma_m bh\sin\beta$ ， γ_m 为组成悬臂梁的岩石容重。 p_{xy} 可分解为轴向力 p_x 和横向力 p_y ，分别为

$$\left. \begin{aligned} p_x &= \gamma_m bh\sin\beta\sin\alpha \\ p_y &= \gamma_m bh\sin\beta\cos\alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

作用在悬臂梁滑床面上的抗剪强度（均布荷载） τ 作用方向与悬臂梁位移方向相反，且不在纵向对称面内，但当其作用线偏离横截面形心 ($b/2$) 不远时，可忽略由其偏心所引起的附加扭转作用，而按作用线通过横截面形心来简化。对于单位长度的梁，其值为

$$\tau = \frac{P_z}{h}\tan\varphi + c = \gamma_m b\cos\beta\tan\varphi + c \quad (4)$$

因而，悬臂梁的变形可以概化为在横向均布荷载 T_y 和轴向压力 T_x 作用下的组合变形，即

$$\left. \begin{aligned} T_x &= q_x + p_x \\ T_y &= q_y + p_y - \tau \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

3.2 弹性挠度曲线方程

悬臂梁在荷载作用下的挠度曲线方程可用三次曲线表示为

$$v = C_1x^3 + C_2x^2 + C_3x + C_4 \quad (6)$$

式中：4 个常数应满足以下边界条件

$$\left. \begin{aligned} x=0 \quad v=0, \quad v=0, \quad v=0, \quad v'''=0 \\ x=L \quad v=\delta, \quad v=0, \quad v=0, \quad v'''=0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)，求得 4 个常数为

$$C_1 = -\frac{\delta}{2L^3}, \quad C_2 = \frac{3\delta}{2L^2}, \quad C_3 = C_4 = 0$$

将其代入式(6)，即得以挠度 δ 为参数的挠度方程：

$$v = \frac{\delta}{2L^3}(3Lx^2 - x^3) \quad (8)$$

式中：参数 δ 可用 Rayleigh-Ritz 能量变分法确定。

对于图 4(a) 所示的弹性系统，其总势能可表示为

$$\Pi = U_0 + U_a - F \quad (9)$$

式中： U_0 为无裂缝时的应变能， U_a 为裂缝引起的应变能增量， F 为外力势能。

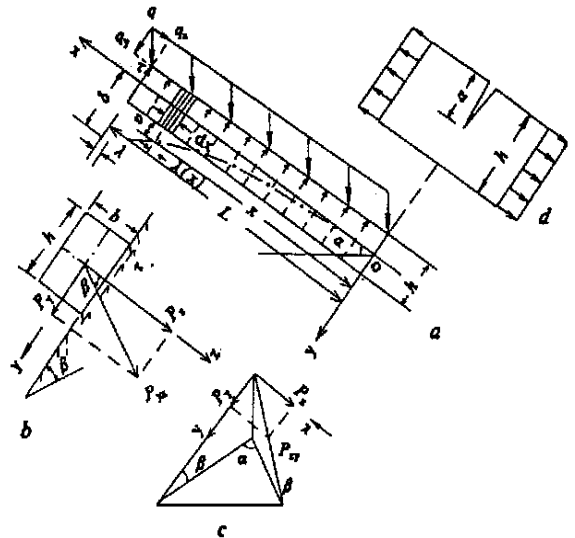


图 4 滑坡悬臂梁计算模型

Fig 4 Cantilever model of the landslide

(1) 无裂缝时的应变能 U_0 。

在线弹性、小变形条件下，梁的应变能可用公式

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^L (v'')^2 dx \quad \text{计算。将式(8)代入并积分得}$$

$$U_0 = \int_0^L \frac{EI}{2} \left(\frac{6\delta}{2L^3} \right)^2 (L-x)^2 dx = \frac{3EI\delta^2}{2L^3} \quad (10)$$

式中： E 为弹性模量； $I = bh^3/12$ ，为梁的惯性矩。

(2) 裂缝应变能增量 U_a 。

由线弹性断裂力学知，平面应力状态下 I 型裂纹引起的应变能增量可用应力强度因子 K_I 表示为

$$U_a = \frac{ab}{E} K_I^2 \quad (11)$$

式中： b 为厚度， a 为裂纹长度。对于图 4(d) 所示宽度为 h ，单边裂纹长度为 a 的有限宽板条模型，在拉应力作用下的 I 型应力强度因子为^[1]

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F \left(\frac{a}{h} \right) \quad (12)$$

式中: 函数

$$F\left(\frac{a}{h}\right) = 1.12 - 0.231\left(\frac{a}{h}\right) + 10.55\left(\frac{a}{h}\right)^2 - 21.72\left(\frac{a}{h}\right)^3 + 30.39\left(\frac{a}{h}\right)^4 \quad (13)$$

将式(12)代入式(11), 积分得

$$U_a = \frac{\pi\sigma^2 a^2 b}{E} \left[F\left(\frac{a}{h}\right) \right]^2 \quad (14)$$

梁的弯矩方程为

$$M(x) = \frac{1}{2}T_y(L-x)^2 + \int_x^L T_x v dx = \frac{1}{2}T_y(L-x)^2 + \frac{\delta}{2L^3}T_x \left(\frac{3}{4}L^4 - Lx^3 + \frac{1}{4}x^4 \right) \quad (15)$$

当 $x = 0$ 时, 可求出裂纹所在截面上的最大拉应力为

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{L}{bh} T_x = \frac{\epsilon}{b} \left(3\epsilon\eta + \frac{9\delta}{4h} - 1 \right) T_x \quad (16)$$

式中: $W = bh^2/6$, 为抗弯截面模量; $\epsilon = L/h$, 为梁的跨长与其截面高度之比; $\eta = T_y/T_x$, 为单位长度梁的横向荷载与轴向荷载之比。将式(16)代入式(14), 有

$$U_a = \frac{\pi a^2 \epsilon^2}{bE} \left(3\epsilon\eta + \frac{9\delta}{4h} - 1 \right)^2 \left[T_x F\left(\frac{a}{h}\right) \right]^2 \quad (17)$$

(3) 外力势能 F

外力势能 F 由横向均布荷载势能 F_y 和轴向均布荷载势能 F_x 组成。将均布荷载视为一系列的集中力 $p_i dx$, 则

$$F_y = \int_0^L p_i \delta_i = \int_0^L T_y v dx = \frac{L}{2} \frac{\delta}{L^3} (3Lx^2 - x^3) T_y dx = \frac{3}{8} \delta T_y \quad (18)$$

由梁任意 x 横截面处的轴向位移量

$$\lambda(x) = \int_0^x \frac{1}{2} (v')^2 dx = \frac{9\delta^2}{8L^6} \left(\frac{4}{3} L^2 x^3 - Lx^4 + \frac{1}{5} x^5 \right) \quad (19)$$

可求出

$$F_x = \int_0^L p_i \lambda = \int_0^L T_x \lambda(x) dx = \frac{3}{16} \delta^2 T_x \quad (20)$$

因此, 外力势能为

$$F = F_x + F_y = \frac{3}{16} \left(\frac{2L}{\delta} \eta + 1 \right) \delta^2 T_x \quad (21)$$

将式(10), (17)和(21)代入式(9)可得系统的总势能为

$$\Pi = \frac{3EI\delta^2}{2L^3} - \frac{3}{16} \left(\frac{2L}{\delta} \eta + 1 \right) \delta^2 T_x + \frac{\pi a^2 \epsilon^2}{bE} \left(3\epsilon\eta + \frac{9\delta}{4h} - 1 \right)^2 \left[T_x F\left(\frac{a}{h}\right) \right]^2 \quad (22)$$

根据变分原理 $\delta\Pi = \frac{\partial\Pi(\delta)}{\partial\delta} d\delta = 0^{[2]}$ 可知,

$\partial\Pi(\delta)/\partial\delta = 0$, 所以由式(22)可得

$$\delta = \frac{L\eta T_x - (3\epsilon\eta - 1)\omega T_x^2}{\frac{8EI}{L^3} - T_x + \frac{9}{4h}\omega T_x^2} \quad (23)$$

式中: ω 可称为张裂缝对悬臂梁弹性挠度曲线的影响系数, 其表达式为

$$\omega = \frac{12\pi a^2 \epsilon^2}{bEh} \left[F\left(\frac{a}{h}\right) \right]^2 \quad (24)$$

将式(23)代入式(8), 得含张裂缝悬臂梁的挠度曲线方程为

$$v = \frac{L\eta T_x - (3\epsilon\eta - 1)\omega T_x^2}{16EI + \left[\frac{9}{2h}\omega T_x^2 - 2T_x \right] L^3} (3Lx^2 - x^3) \quad (25)$$

对于无裂缝悬臂梁, 由式(24)知, $\omega = 0$, 上式变为

$$v = \frac{L\eta T_x}{16EI - 2T_x L^3} (3Lx^2 - x^3) \quad (26)$$

取 $x = L$, 代入式(26), 可得最大挠度为

$$\delta = \frac{T_x L^4}{8EI - T_x L^3} \quad (27)$$

在轴向荷载等于零时, $\delta = T_x L^4/8EI$, 与悬臂梁仅受横向均布荷载时自由端最大挠度值^[3]完全相同。因此用能量法得到的含张裂缝悬臂梁的挠度曲线方程, 对于工程计算来说其精度是完全满足要求的。

3.3 悬臂梁极限承载力及滑坡稳定性

悬臂梁张裂缝的出现显著地降低了它的承载力。由断裂力学中的应力强度因子准则可知, 当应力强度因子 $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}F(a/h)$ 达到材料断裂韧性 K_c 时, 裂缝将发生失稳扩展, 导致滑坡锁固端破坏, 即有极限承载力准则

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}F\left(\frac{a}{h}\right) = K_c \quad (28)$$

将式(16)代入式(28), 得梁的极限荷载为

$$\eta = \frac{\theta}{T_x} - \frac{3}{4} \frac{\delta}{\theta h} + \frac{1}{3\epsilon} \quad (29)$$

式中: θ 称为裂缝对悬臂梁极限承载力的影响系数, 其值为

$$\theta = \frac{bK_c}{3\epsilon^2 \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{h}\right)} \quad (30)$$

悬臂梁的荷载-挠度曲线和极限承载力-挠度曲线分别如图 5 中的曲线 OCB 和 ACD 所示。当荷载 η 从零逐渐增加时, 挠度 δ 缓慢增大。当挠度发展到一定程度(亦即滑坡变形到一定阶段时), 梁固定端(滑坡锁固段)截面的弯矩变得较大, 以致于梁的顶部受拉区内裂缝尖端的应力强度因子 $K_I = K_c$, 即应力达到 C 点, 裂缝将失稳扩展, 相应的变形沿着 CD 快速发展; 而不再像弹性变形那样沿 CB 发展。因此 C 点对应的荷载即为极限承载力。联立式(23)和(29), 并代入 ϵ 及 L , 可求得极限承载力 $\eta =$

$$\frac{(\frac{\theta}{T_x} + \frac{h}{3}) [\frac{8}{9} bE (\frac{h}{L})^3 - \frac{4}{3} T_x + \frac{3}{h} \omega T_x^2] - \omega T_x^2}{[\frac{8}{9} bE (\frac{h}{L})^3 - \frac{1}{3} T_x] \mathcal{L}} \quad (31)$$

从式(24), (30)与(31)可见, 裂缝 a 越长, 则 ω 越大, θ 越小, 极限承载力 η 也越小。由式(23), (28)与(29)还可推出滑坡稳定系数的表达式为

$$S = \frac{K_1}{K_c} = \frac{T_x}{\theta} \cdot \left\{ \frac{T_x}{T_x} + \frac{3}{4} \frac{[L T_y - \omega \left(\frac{3L}{h} \frac{T_x}{T_x} - 1 \right) T_x^2] L^2}{\frac{2}{3} bE h^3 + \left(\frac{9}{4h} \omega T_x^2 - T_x \right) L^3} - \frac{h}{3L} \right\} \quad (32)$$

当 $S < 1$, 亦即 $K_1 < K_c$ 时, 滑坡处于稳定状态; $S = 1$, 即 $K_1 = K_c$, 侧翼锁固端拉裂破坏, 滑坡处于临界失稳或失稳状态。式(32)即为侧翼锁固平面旋转式滑坡稳定系数的解析公式。

4 实例分析

根据滑坡几何特征及岩体力学参数, 取 $l = 230$ m, $t = 130$ m, $h = 16$ m, $L = 110$ m, $b = 25$ m, $\mathcal{X}_1 = 24$ kN/m³, $\mathcal{X}_2 = 26$ kN/m³, $\alpha = 31^\circ$, $\beta = 37^\circ$, $\varphi = 21^\circ$, $c = 0.0015$ MPa, $E = 1.5 \times 10^4$ MPa, $K_c = 28.45$ MPa \sqrt{m} 。当侧翼锁固端无张裂缝出现时, “悬臂梁”的挠度(位移) v 值随悬臂长度 x 而逐渐增大的情况见表1。不同裂缝长度时, 裂缝对弹性挠度曲线的影响系数 ω 对“悬臂梁”极限承载力的影响系数 θ 以及所对应的滑坡稳定系数 S 见表2。

表1 不同悬臂长度时的挠度值

Table 1 Variation of deflection with the length of cantilever

| x/m | v/m |
|-------|-------|
| 5 | 0.019 |
| 15 | 0.172 |
| 25 | 0.463 |
| 35 | 0.878 |
| 45 | 1.402 |
| 55 | 2.020 |
| 65 | 2.720 |
| 75 | 3.485 |
| 85 | 4.300 |
| 95 | 5.152 |
| 105 | 6.026 |
| 110 | 6.466 |

由表1可见, $x = 85$ m 与 105 m 处悬臂梁挠度值 $v = 4.3$ m, 6.026 m, 分别与相应观测点 A₉ 处实际位移 4.286 m, 760 m 平台处砾石层错断 6.07 m 大

小相一致, 且不同悬臂长度时的挠度变化趋势与滑坡南小北大顺层渐增的变形相吻合, 说明滑坡变形模式与计算模型符合滑坡的动力学规律。由表2可见, 当 $a \ll h$ 亦即 $F(a/h) = 1.12$ 时, 滑坡稳定系数 $S = 0.97$, $K_1 < K_c$, 滑坡处于稳定状态, 与目前滑坡($h = 16$ m 时)实际状况相一致, 也说明应用式(32)所给的稳定性判据在工程上估算滑坡的稳定性是可行的。

表2 不同裂缝长度时的滑坡稳定系数

Table 2 Variation of stability factor with the length of fracture

| a/h | $F(a/h)$ | $\omega \times 10^{-2}$ | θ | S |
|--------|----------|-------------------------|----------|--------|
| 0.0002 | 1.12 | 3.8×10^{-7} | 44.67 | 0.97 |
| 0.05 | 1.13 | 0.02 | 2.79 | 15.58 |
| 0.01 | 1.18 | 0.11 | 1.89 | 23.05 |
| 0.15 | 1.26 | 0.27 | 1.44 | 30.15 |
| 0.20 | 1.37 | 0.57 | 1.15 | 37.71 |
| 0.25 | 1.50 | 1.07 | 0.94 | 46.14 |
| 0.30 | 1.65 | 1.89 | 0.77 | 55.84 |
| 0.35 | 1.85 | 3.21 | 0.64 | 67.33 |
| 0.40 | 2.1 | 5.38 | 0.53 | 81.34 |
| 0.45 | 2.4 | 9.01 | 0.43 | 98.76 |
| 0.50 | 2.8 | 15.18 | 0.35 | 120.65 |

5 结论

(1) 侧翼锁固平面旋转式滑坡的稳定性判据适用于切向层状岩体(即岩层倾向与坡面倾向斜交, 岩层走向与坡面走向的夹角 $\gamma > 30^\circ$; 岩层的倾角 $\alpha > 10^\circ$)边坡, 当边坡岩体绕垂直于潜在滑面的旋转轴发生不对称平面旋转式变形时形成的滑坡类型。

(2) 滑坡平面旋转式变形的位移量(挠度) v 取决于滑坡荷载 q , 岩层倾角 α 及滑坡锁固端岩石弹性模量 E 的大小。荷载 q 与滑坡体几何参数 l, t, h, L, b, β 及岩体力学参数 $c, \varphi, \mathcal{X}_1, \mathcal{X}_2$ 的大小有关。当荷载 q 一定时, 岩层倾角 α 越小, 弹性模量 E 越小, 位移量 v 越大。

(3) 滑坡稳定系数 S 与滑坡锁固端应力强度因子 K_1 大小及岩石断裂韧性 K_c 值有关。当滑坡的变形量 v 达到临界值时, 锁固端岩石中张裂缝 a 越大, 即 a/h 愈大, S 越大, 滑坡稳定性愈小。

参 考 文 献

- 1 丁遂栋, 孙利民 断裂力学[M] 北京: 机械工业出版社, 1997
- 2 龙驭球, 包世华 结构力学[M] 北京: 高等教育出版社, 1988
- 3 孙训方, 方孝淑, 关来泰 材料力学[M] 北京: 人民教育出版社, 1980

STUDY ON DYNAMICS MECHANISM OF LANDSLIDE WITH LOCKED FLANK IN PLANE ROTATION

Cheng Qiangong¹, Hu Houtian¹, Peng Jianbing²

(¹ Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China)

(² Chang'an University, Xi'an 710054 China)

Abstract The landslide with locked flank in plane rotation is progressively formed while the slope rock mass shows an asymmetrical rotation revolving round on the axis perpendicular to the latent sliding plane. Its displacement mode may be generalized as a cantilever under both the well-distributed horizon load and the vertical compression. For the cantilever with a fracture situated on the locked later section where the maximum tensile stress appears, the elastic deflection-load equation is established by using Rayleigh-Ritz energy method. Then, the fracture criterion of the stress intensity factor is used to determine the critical load, and consequently the analytical formula of stability factor for the landslide is derived. In addition, a typical landslide is illustrated as an example of the use of above formula. Thus, the dynamics mechanism for the landslide is demonstrated theoretically.

Key words landslide, plane rotation, dynamics, stability

《岩石力学与工程学报》所刊论文 1998 年被引统计表(V) (续 I)

| No. | 被引论文 | | | 引用论文 | | | |
|-----|------|--------------------------|-------------|------|--------------------------|-----------|-------------|
| | 第一作者 | 文名 | 刊期 | 第一作者 | 文名 | 刊名 | 刊期 |
| 130 | 吴政 | 单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究 | 1996, 15(1) | 徐耀民 | 描述岩石破坏的非线性共振模型 | 实验力学 | 1998, 13(2) |
| 131 | 杨更社 | 岩石损伤特性的 CT 识别 | 1996, 15(1) | 杨更社 | 岩石材料损伤变量与 CT 数间的关系分析 | 力学与实践 | 1998, 20(4) |
| 132 | 梁冰 | 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法 | 1996, 15(2) | 冉启全 | 油藏渗流与应力耦合分析 | 岩土工程学报 | 1998, 20(2) |
| 133 | 靳钟铭 | 煤体裂隙分形与顶煤冒放性的相关研究 | 1996, 15(2) | 靳钟铭 | 坚硬煤层综放开采试验研究 | 煤炭科学技术 | 1998, 26(2) |
| 134 | 宋振骥 | 煤矿岩层控制的研究重点与方向 | 1996, 15(2) | 乔河 | 采动诱发岩体移动破坏过程数值模拟研究 | 工程地质学报 | 1998, 6(4) |
| 135 | 靳钟铭 | 煤体裂隙分形与顶煤冒放性的相关研究 | 1996, 15(2) | 谢和平 | 放顶煤开采巷道裂隙的分形研究 | 煤炭学报 | 1998, 23(3) |
| 136 | 梁冰 | 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法 | 1996, 15(2) | 孙培德 | 上保护层保护范围的固气耦合分析 | 岩石力学与工程学报 | 1998, 17(增) |
| 137 | 朱诗顺 | 放顶煤开采工作面上覆煤岩体的结构 | 1996, 15(2) | 张顶立 | 综采放顶煤工作层结构分析 | 中国矿业大学学报 | 1998, 27(4) |
| 138 | 张玉军 | 鸡笼山金矿南缘采场开挖、充填方案比选的有限元分析 | 1996, 15(2) | 乔春生 | 大团山矿床采空区处理方法 | 中国有色金属学报 | 1998, 8(4) |
| 139 | 张玉军 | 鸡笼山金矿南缘采场开挖、充填方案比选的有限元分析 | 1996, 15(2) | 肖专文 | 莱芜铁矿谷家台矿区开采方案优选的三维有限元分析 | 中国矿业 | 1998, 7(4) |
| 140 | 梁海波 | FLAC 程序及其在我国水电工程中的应用 | 1996, 15(3) | 程桦 | 三峡船闸及高边坡非线性大变形数值分析 | 岩土力学 | 1998, 19(4) |
| 141 | 周维垣 | 流形元法及其在工程中的应用 | 1996, 15(3) | 杨强 | 损伤破坏理论与结构破坏仿真系统 TFNE 的研制 | 岩石力学与工程学报 | 1998, 17(增) |
| 142 | 徐天平 | PII 低应变动力试桩理论及试验研究 | 1996, 15(3) | 王靖涛 | 桩基完整性检测的模型试验研究 | 岩石力学与工程学报 | 1998, 17(增) |

(待续)