

基于改进动态规划算法的堆积体滑坡稳定分析

石 崇^{1, 2}, 尤 林³, 徐卫亚^{1, 2}, 黄 玮^{1, 2}, 张玉龙^{1, 2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098
3. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 应用图论将堆积体滑坡稳定性分析中最危险滑动面搜索及安全系数计算问题转化为数学领域求最短路径问题。对动态规划算法进行改进, 建立基于改进动态规划算法的极限平衡有限元方法, 给出该方法的基本方程和路径上应力计算过程, 避免引入辅助函数需给定初始安全系数进行迭代计算的缺陷。将该方法应用于溪洛渡左岸谷肩堆积体的稳定性分析, 基于滑坡产生、发展、蠕变条件对其稳定性进行判断, 对该堆积体的变形破坏机制进行分析和滑面形成条件探讨; 借助监测资料揭示的滑面分布, 验证改进动态规划算法搜索滑面位置与计算安全系数的准确性; 在此基础上提出基于滑坡征兆的堆积体滑坡稳定性分析技术路线, 可用于复杂滑坡堆积体边坡的稳定性分析。

关键词: 边坡工程; 滑坡稳定; 改进动态规划算法; 极限平衡有限元法; 变形破坏机制

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 2 - 3599 - 08

STABILITY ANALYSIS OF DEPOSIT LANDSLIDE BASED ON IMPROVED DYNAMIC PROGRAMMING ALGORITHM

SHI Chong^{1, 2}, YOU Lin³, XU Weiya^{1, 2}, HUANG Wei^{1, 2}, ZHANG Yulong^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Based on graph theory, investigation of the most dangerous sliding surface and safety coefficient calculation in slope stability analysis is transformed into solution of shortest path problem in mathematics. The dynamic programming algorithm is improved to build a limit equilibrium finite element method(FEM), in which the basic equation is given and the stress along the sliding surface is computed so as to avoid the computing iterative procedure because of given safety coefficient when auxiliary function is introduced. Then the improved method is applied to analyze the stability of landslide deposit at left bank, Xiluodu hydropower station. The safety coefficient is estimated based on the fracture appearance, landslide development and creep deformation under nature condition, then the deformation and failure mechanism is studied. According to monitoring data of hole with clinometer. The sliding surface of limit equilibrium finite element method is compared with reality, so the accuracy of this improved method is verified and stability under rainfall condition is discussed. At last, a analysis procedure is put forward based on limit equilibrium FEM, which is proved more suitable for stability analysis of deposit landslides.

Key words: slope engineering; landslide stability; improved dynamic programming algorithm; limit equilibrium finite element method; deformation and failure mechanism

收稿日期: 2012 - 04 - 11; **修回日期:** 2012 - 05 - 15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013504); 教育部博士点基金项目(20090094120017); 中央高校基本科研业务费专项资助

作者简介: 石 崇(1978 -), 男, 2008 年于河海大学岩土工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: shichong81@126.com

1 引言

滑坡堆积体是一类特殊的边坡，其物质组成复杂，应力状态受岩土介质的变形与强度特性共同控制，采用刚体极限平衡计算边坡稳定时需进行条间假设，且不满足变形协调原理，计算结果差别较大。尤其当滑坡堆积体局部已经处于塑性状态，此时应力向周围岩体传递以进入新的平衡状态，条分法假设不能考虑该因素的影响。

边坡稳定性计算的关键是如何确定滑面并计算滑面上的应力^[1]。动态规划理论是数学建模中求解极值问题的强有力工具，R. Baker^[2]首次将动态规划理论应用到边坡稳定性分析中，随后，曹文贵和颜文贵^[3]基于 Janbu 法提出了利用动态规划确定非圆弧临界滑面及相应的最小安全系数的方法。H. T. V. Pham 和 D. G. Fredlund^[4]采用基于剪应力上的安全系数的定义，开发了 DYNPROG 程序，应用于均质土和非均质土，并将计算结果与极限平衡方法进行对比，验证了动态规划法在边坡稳定分析滑面搜索中的有效性。冯紫良等^[5]在三维弹塑性有限元计算基础上建立了采用动态规划理论确定三维滑动面方法，通过工程实例检验了方法的可行性。范鹏贤等^[6]根据推力最大原理，将寻求安全系数最小问题转化为寻求剩余推力最大问题。引入动态规划方法，基于条间推力递推方程的最优决策方法和步骤，对边坡斜条块划分组合进行了优化，搜索出剩余推力最大的划分组合，该组合可充分接近塑性力学解。

但是，将基于动态规划算法的极限平衡有限元方法应用于滑坡堆积体的稳定分析并不容易。一方面边坡的应力状态不仅与岩土介质的强度特性有关，也与变形特性有关；另一方面如何使得滑面搜索过程不会陷入局部最优从而导致滑面呈现锯齿状仍是一大难题^[7-12]。本文基于数值计算成果，对动态规划算法进行了改进，探讨了滑面搜索过程中应力插值与滑面搜索问题。将理论成果应用于溪洛渡左岸谷肩堆积体的稳定性分析，用监测资料、地质勘查资料对该方法的实用性进行了验证。提出了基于滑坡征兆的滑坡堆积体稳定性分析技术路线，可用于复杂滑坡堆积体边坡的稳定性分析。

2 边坡稳定改进动态规划算法

如图 1 所示，边坡稳定性问题可以转变为图论中的最短路径问题，计算模型中网格的节点看作图

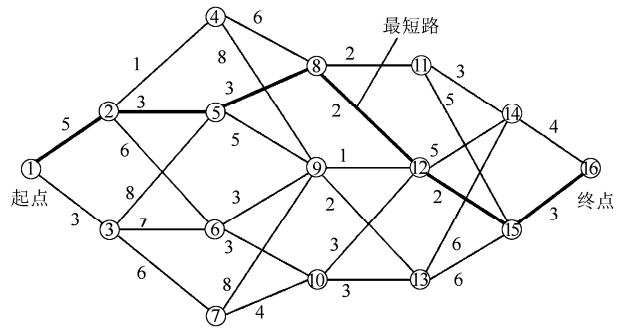


图 1 最短路径问题示意图

Fig.1 Sketch of shortest path problem

论中的顶点，两节点连成的边看作图论中的边，计算模型中的网格转换为图论中的无向图^[1]，其公式为

$$G = \{V(G), E(G), \varphi_G\} \quad (1)$$

式中： $V(\cdot)$ 为顶点集， $E(\cdot)$ 为边集， φ_G 为关联函数。

2.1 安全系数的定义

边坡平面模型中的滑面可划分多个段，每一个段上的节点称为一个状态点，从起始点到终止点可绘制一条路径，因此最危险滑动面可视作由一系列连续的线段组成。每条线段由处在 2 个相邻阶段上的状态点连接而成。从而将连续问题离散化，相应滑面上的安全系数定义为

$$F_s = \int_A^B \tau_t dL / \int_A^B \tau dL = \sum_{k=1}^n (\tau_k \Delta L_k) / \sum_{k=1}^n (\tau_k \Delta L_k) \quad (2)$$

式中： n 为滑动面所经过的阶段的数量， τ 为沿滑动面滑动方向的剪应力， τ_t 为剪切强度， dL 为沿滑动面的长度增量， τ_k 为从第 k 阶段到第 $k+1$ 阶段路径上的剪应力， τ_{tk} 为从第 k 阶段到第 $k+1$ 阶段路径上的抗剪强度， ΔL_k 为从第 k 阶段到第 $k+1$ 阶段路径的长度。

2.2 抗滑力和下滑力的计算

设滑面路径点坐标为 (x, y) ，首先搜索其所处的单元，通过该单元 4 个节点的应力张量插值计算该路径点的应力张量。

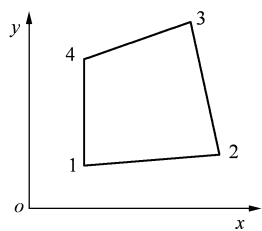
(1) 路径点应力张量的计算

单元内一点 (x, y) 的应力张量可通过以下插值公式求得

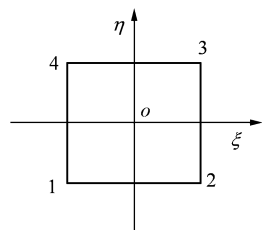
$$\sigma^r = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta) \sigma_i^r \quad (3)$$

式中： ξ, η 均为单元对应母元的局部坐标； x, y 均为单元整体坐标； σ_i^r 为第 i 个节点的应力张量。

根据有限元映射理论^[13]，如图 2 中(a)所示的单



(a) 单元



(b) 母元

图 2 坐标系统变换

Fig.2 Transform of coordinate system

元，可由图 2 中(b)所示的母元映射得到。有以下关系：

$$x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta)x_i \tag{4}$$

$$y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi, \eta)y_i \tag{5}$$

对于四节点四边形单元，有

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \tag{6}$$

将式(6)代入式(4)，(5)得

$$4x = \sum_{i=1}^4 x_i + \left[\sum_{i=1}^4 (\xi_i x_i) \right] \xi + \left[\sum_{i=1}^4 (\eta_i x_i) \right] \eta + \left[\sum_{i=1}^4 (\xi_i \eta_i x_i) \right] \xi \eta \tag{7}$$

$$4y = \sum_{i=1}^4 y_i + \left[\sum_{i=1}^4 (\xi_i y_i) \right] \xi + \left[\sum_{i=1}^4 (\eta_i y_i) \right] \eta + \left[\sum_{i=1}^4 (\xi_i \eta_i y_i) \right] \xi \eta \tag{8}$$

令

$$a_1 = \sum_{i=1}^4 x_i, \quad b_1 = \sum_{i=1}^4 (\xi_i x_i)$$

$$c_1 = \sum_{i=1}^4 (\eta_i x_i), \quad d_1 = \sum_{i=1}^4 (\xi_i \eta_i x_i)$$

$$a_2 = \sum_{i=1}^4 y_i, \quad b_2 = \sum_{i=1}^4 (\xi_i y_i)$$

$$c_2 = \sum_{i=1}^4 (\eta_i y_i), \quad d_2 = \sum_{i=1}^4 (\xi_i \eta_i y_i)$$

由式(7)得 $\eta = [4x - (a_1 + b_1 \xi)] / (c_1 + d_1 \xi)$ ，代入式(8)整理得

$$(b_2 d_1 - d_2 b_1) \xi^2 + (a_2 d_1 - d_2 a_1 + b_2 c_1 - c_2 b_1 + 4x d_2 - 4y d_1) \xi + (a_2 c_1 - c_2 a_1 + 4x c_2 - 4y c_1) = 0 \tag{9}$$

将式(9)简化为一元二次方程为

$$A \xi^2 + B \xi + C = 0 \tag{10}$$

其中，

$$A = b_2 d_1 - d_2 b_1$$

$$B = a_2 d_1 - d_2 a_1 + b_2 c_1 - c_2 b_1 + 4x d_2 - 4y d_1$$

$$C = a_2 c_1 + 4x c_2 - c_2 a_1 - 4y c_1$$

当 $A = 0$ 时，解得式(9)的 2 个根分别为： $\xi_1 = \xi_2 = -C/B$ 。当 $A \neq 0$ 时，解得方程的 2 个根分别为： $\xi_{1,2} = (-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}) / (2A)$ 。

由于 ξ 的取值范围为 $[-1, 1]$ ，可确定一个满足取值范围的 ξ ，代入式(7)可求得 η ，代入式(3)可求得单元内任一点的应力张量，进而可求得单元形心的应力张量。

(2) 下滑力与抗滑力的计算

最危险滑动面定义为式(1)取最小值时所对应的滑动面，设滑动方向向右，逆时针为下滑力正方向，此时最危险滑动面与 x 轴的夹角可分钝角或锐角进行计算(见图 3)。

滑动面上一点的抗剪强度 τ_f 和切向应力 τ 的计算公式如下：

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin(2\alpha) + \tau_{xy} \cos(2\alpha) \tag{11}$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos(2\alpha) - \tau_{xy} \sin(2\alpha) \tag{12}$$

$$\tau_f = (\sigma_n - p) \tan \varphi' + c' \tag{13}$$

式中： $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 为单元形心的正应力和切应力； φ', c' 分别为材料的内摩擦角和黏聚力； σ_n 为法向应力； p 为孔隙水应力； α 为与水平面的夹角。

2.3 改进动态规划算法求解

若将安全系数方程作为目标函数，利用动态规划法可将求最小安全系数的问题转换为最优化问题，目标函数定义为

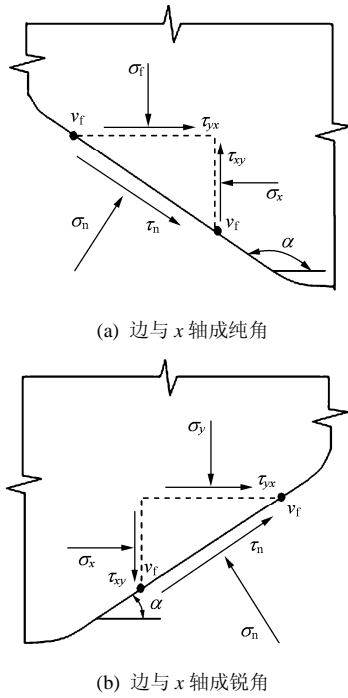


图3 下滑力的定义

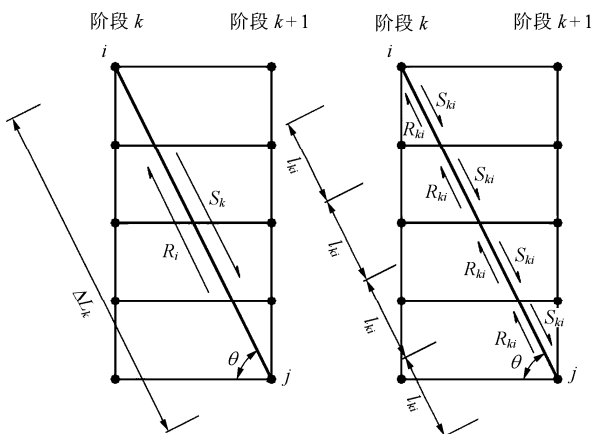
Fig.3 Definition of sliding force

$$f = \min \frac{\sum_{k=1}^n R_k}{\sum_{k=1}^n S_k} = \min \frac{\sum_{k=1}^n (\tau_{ik} \Delta L_k)}{\sum_{k=1}^n (\tau_{ik} \Delta L_k)} \quad (14)$$

式中： R_k 为作用在第 k 段滑动面上的抗滑力， S_k 为作用在第 k 段滑动面上的下滑力。

假设搜索的第 k 段滑动面上的滑动力与抗滑力如图 4 所示，搜索的滑动点可以在两控制点之间进行插值，因此滑动面不需要经过数值计算的节点，可以减少搜索滑面的凹凸性，得出光滑的滑动面。

改进动态规划算法的状态变量设为 x_k ，决策函数为 $u_k(x_k)$ ，指定了第 k 阶段上的状态点到第 $k+1$ 阶段上的状态点的相应的路径，允许决策集合为



(a) 阶段 $k \sim k+1$ 滑面力分解(1) (b) 阶段 $k \sim k+1$ 滑面力分解(2)

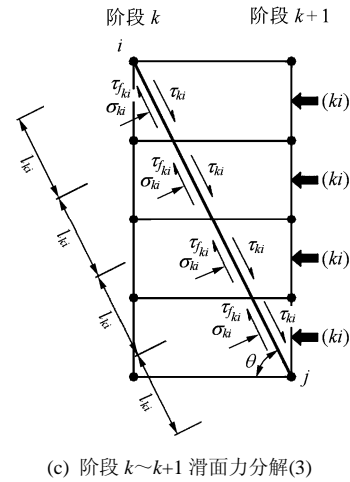


图4 第 k 段滑面上的滑动力与抗滑力

Fig.4 Sliding force and resistance force at No. k surface

$D_k(x_k)$ ，即所有路径的集合，由此确定状态转移方程为 $x_{k+1} = u_k(x_k)$ 。

所有后部子过程上的指标函数分为下滑力和抗滑力两部分，分别用 $V_k^k(x_k, x_{k+1}, L, x_{n+1}, u_k, u_{k+1}, L, u_n)$ 和 $V_k^x(x_k, x_{k+1}, L, x_{n+1}, u_k, u_{k+1}, L, u_n)$ 表示，指标函数用阶段指标和函数的形式来表示，定义为

$$V_k^k = \sum_{k=j}^n v_k^k(x_k, u_k) \quad (j=1, 2, L, n) \quad (15)$$

$$V_k^x = \sum_{k=j}^n v_k^x(x_k, u_k) \quad (j=1, 2, L, n) \quad (16)$$

$p_k^* = \{u_k^*, u_{k+1}^*, L, u_n^*\}$ 为全过程的最优策略，指标函数的最优目标函数值可表示为

$$f_k(x_k) = \min_{u_k \in D_k(x_k)} \frac{V_k^k(x_k, p_k)}{V_k^x(x_k, p_k)} = \frac{V_k^k(x_k, p_k^*)}{V_k^x(x_k, p_k^*)} \quad (17)$$

故改进动态规划算法的基本方程为

$$\left. \begin{aligned} f_k(x_k) &= \min_{u_k \in D_k(x_k)} \left\{ \frac{V_k^k(x_k, u_k(x_k)) + V_{k+1}^k(x_k, p_k)}{V_k^x(x_k, u_k(x_k)) + V_{k+1}^x(x_k, p_k)} \right\} \\ f_{n+1}(x_{n+1}) &= 0 \\ x_{k+1} &= u_k(x_k) \\ (k &= n, n-1, L, 1) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3 工程案例研究

3.1 工程概况

溪洛渡水电站左岸谷肩堆积体位于左岸厂房进

水口、左岸泄洪隧洞进水口和左岸缆机平台上部 14 层玄武岩顶部。上起兴田沟，下至象鼻子沟下游分支附近，河长 1 400 m，横河宽 600 m，平面面积 $8.4 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，钻孔揭示其厚度为 59.6~166.9 m，初估总体积约为 $8.2 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。堆积体由下至上，从老到新依次为古滑坡残体，冰川冰水堆积体、洪积和崩坡积，其中以冰水堆积和洪坡积层为主。根据工程部位将左岸谷间堆积体划分为 I，II，III 区共 3 个区(见图 5)。

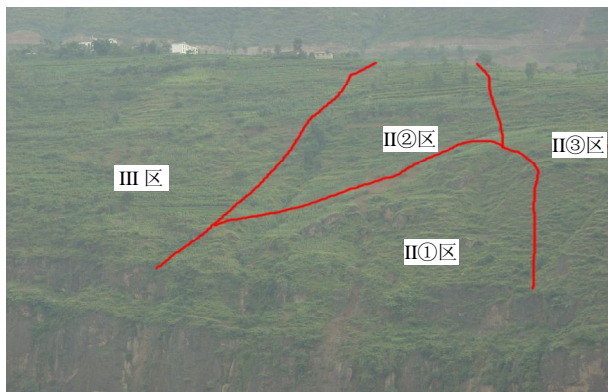


图 5 滑坡体分布
Fig.5 Distributions of landslide

如果这些堆积体出现进一步失稳，将会严重影响水电站进水口、泄洪洞进口及左岸缆机平台的安危。在施工过程中，第一次削坡开挖于 2005 年 5 月完成后，由于未及时进行支护且经过雨季。至 2005 年 9 月底，1#无名沟附近的洪积层在开挖坡顶已发生变形，其中，下游侧冰川冰水堆积体上部的洪积物，在开口线附近出现较为明显的浅层变形，变形范围约 $10 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (垂直金沙江方向 \times 顺江方向)，变形体的前缘位于洪积物与冰川冰水堆积物的界面附近，并有一定程度的向外鼓出，为潜在的剪出口，变形体的后缘出现拉陷槽，深 30~50 cm，后侧陡坎最大高度达 120 cm；上游侧变形范围主要集中在开口线外侧截水沟附近的地形转折处，拉裂缝宽 5~10 cm，延伸较长，后侧有高 30~50 cm 的错动台坎，典型裂隙面如图 6 所示。



(a) 后缘裂隙(1)



(b) 后缘裂隙(2)



(c) 前缘剪出口 (d) 前缘局部滑面分布

图 6 拉裂隙分布

Fig.6 Distribution of tensile fractures

3.2 稳定性计算

溪洛渡左岸谷肩堆积体受长期的地质作用，在近地表部位，尤其是古滑坡体与冰水堆积体分界面较为复杂，典型剖面如图 7 所示。在采用刚体极限平衡计算时最为险滑面位于表层洪、坡积层内，与初始的地质判断存在较大的出入。故本文建立如图 8 所示数值模型，采用表 1 中岩土物理力学参数进行弹塑性数值计算，得到其应力场后，运用动态规划法搜索其最危险滑面。

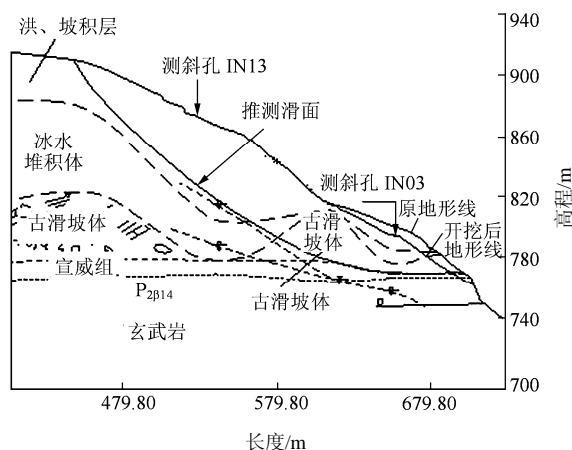


图 7 典型地质剖面

Fig.7 Typical geological section

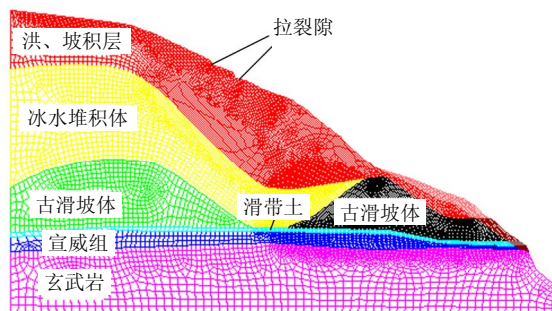


图 8 数值模型

Fig.8 Numerical model

结果发现：溪洛渡左岸谷肩堆积体最危险滑面应沿着洪坡积层深部、中间穿越冰水堆积体与古滑坡体，与宣威组砂岩上部的一层滑带贯通(见图 9)，

表 1 岩土物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock and soil layers

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形 模量/ MPa	剪切 模量/ MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角/(°)	抗拉 强度/ MPa
洪、坡积层	1 950	83	27.8	45	22.0	0.0
冰水堆积体	2 050	830	385.0	80	33.0	0.1
滑坡堆积体	2 000	750	346.0	50	26.5	0.1
滑带土	2 000	56	19.0	30	18.0	0.0
宣威组	2 500	4 500	233.0	300	35.0	1.0
玄武岩	2 800	13 333	8 000.0	1 000	45.0	10.0

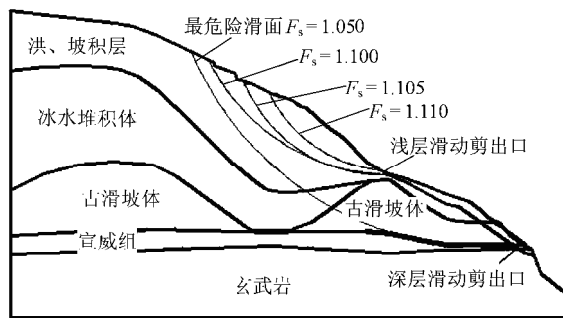


图 9 滑面位置及安全系数

Fig.9 Locations of sliding surface and safety factors

安全系数为 1.050。但同时洪、坡积层的浅层滑面以古冰水堆积体上部边界剪出为主，后缘位置分布较广，多条浅层滑动面安全系数变化很小，均在 1.100 左右。地质调查表明深层滑面未见地下水影响，故降雨仅影响洪、坡积层浅层滑面，采用滑面施加 3 m 水头近似模拟降雨，得浅层滑面安全系数为 1.001 (图 9 中安全系数为 1.105 的滑面)。其值低于深层滑面，表明该滑坡体在雨季表层变形较明显，这与

2005 年观测到的现象一致。

深层滑动面上法向与切向应力分布(见图 10)表明，法向与切向应力随深度近似线性增加，但在滑面剪出口部位均急剧下降，法向与切向应力的比值则自后缘到剪出口经历了先逐步递减再逐步增加的过程。在后缘部位滑面陡峭，故剪应力偏小，而在洪、坡积层深层法/切应力比逐步减小，表明表层滑坡为推移式；而在滑带土内，由于滑面接近水平，应力比开始逐步增加，表明其受后方不平衡力的影响而蠕滑。故该滑坡堆积体为复合型滑坡运动模式，深层滑动受降雨影响小，处于推移式缓慢蠕滑状态；浅层则受降雨影响明显，滑动面的后缘位置与裂隙面统计位置(见图 6)基本一致可以证明这一点。故对该堆积体滑坡进行治理时，深层滑面上应以滑带土锚固治理为主，而浅层治理应以隔绝地表水入渗、坡内排水为主。

3.3 滑动面与监测资料对比

如图 7 所示，该剖面较为接近的钻孔倾斜仪有 2 个。IN03 钻孔倾斜仪，于 2006 年 7 月 13 日取基准值，截止 2006 年 12 月底，各钻孔测斜仪 A 向(左右岸方向)位移(见图 11(a))均远远大于 B 向(上下游方向)位移，说明变形主要表现为河谷方向位移，与变形监测点监测结果一致。

IN13 钻孔倾斜仪于 2007 年 5 月 6 日取得基准值，2009 年 4 月被人为堵塞，2010 年 8 月 7 日对该孔钻孔测斜仪进行了重新安装，有效观测深度为 106.5 m。从截止 2011 年 10 月的监测资料和虚拟地质钻孔取样图来看(见图 11(b))，该部位的滑动面主要位于 99.5~103.5 m 区段，玄武岩与古滑坡堆积交

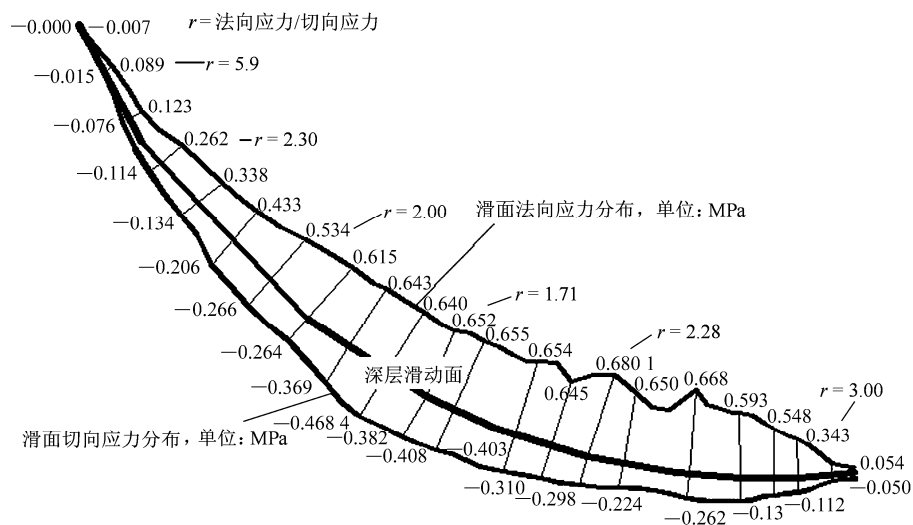


图 10 沿滑面法向与切向应力分布规律

Fig.10 Distributions of normal and tangential stress along sliding surface

动量不大，滑动面位移无加速增长趋势。

图 11 表明，溪洛渡左岸谷肩堆积体的最危险滑面位于滑坡堆积体与宣威组上部交界处，这与历史监测资料所揭示的滑动面位置一致，最大错动量发生在 101 m 深处，左右岸方向(A 向)位移为 6.69 mm，滑动面上下游方向(B 向)错界位移，与极限平衡有限元搜索出的滑面一致。而位于坡剪出口部位的滑体变形较为一致，仅在表层 3~5 m 内产生了变形突变。而测斜仪 IN13 位于滑坡体后部，除底部滑面附近非常明显外，洪、坡积层变形呈现出上部大、下部小的趋势，表明洪坡积层在滑坡过程变形趋势也在发展，有产生局部浅层滑动的趋势。

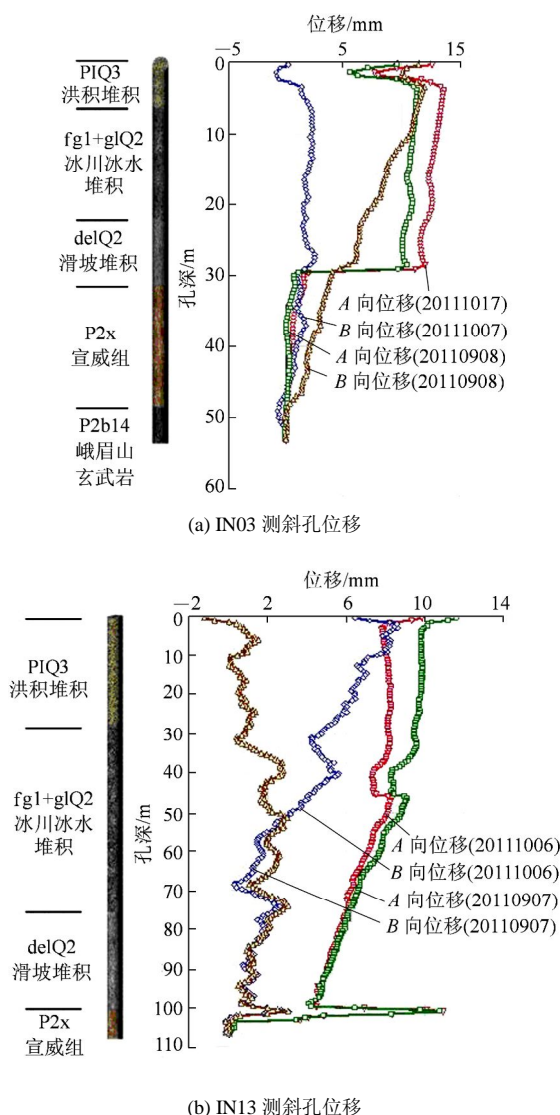


图 11 位移 - 孔深关系曲线

Fig.11 Relationship curves of displacement with hole depth

由于滑坡体沿着深层蠕滑、浅层受降雨影响局部也存在滑移，在堆积体表面有后倾的趋势，故位移会突然减小，这也佐证了堆积体是复合型滑坡的

判断。

4 堆积体稳定分析思路

滑坡堆积体很容易在自重、降雨、开挖等因素共同影响下产生破坏，由于介质的不均匀性、非连续性，少量的岩土力学试验代表性较差，导致其力学参数往往难以确定。同时由于地质专业基于设计上的保守考虑，提出的岩土力学参数往往进行了不同程度的折减，导致基于条分法的极限平衡法很难得出合理的结果，常出现安全系数小于 1.0 而无任何滑坡征兆的情况。因此针对滑坡堆积体，基于极限平衡有限元计算方法的优越性，本文提出根据滑坡征兆进行分析的堆积体稳定性分析思路(见图 12)。

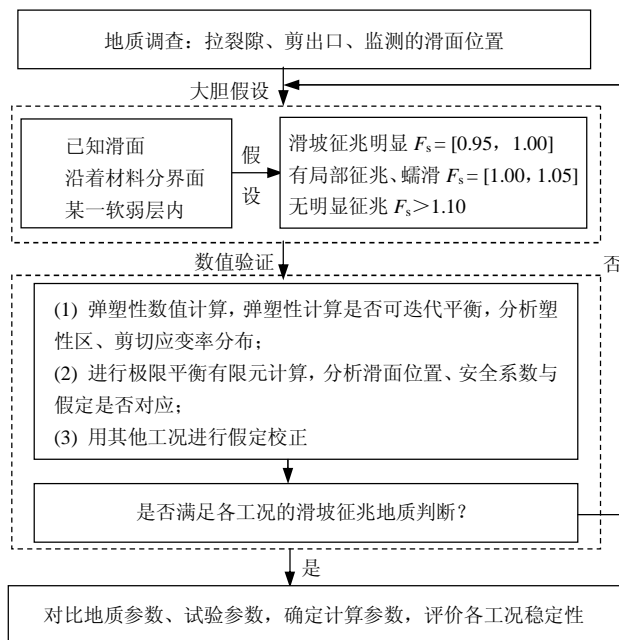


图 12 滑坡堆积体极限平衡有限元稳定分析流程
Fig.12 Process of FEM of limit equilibrium on landslide deposits

基于该思路，堆积体滑坡稳定性评价过程可表示如下：

- (1) 首先对滑坡堆积体进行地质勘查，统计其拉裂隙分布、剪出口等宏观表面特征及钻孔内部变形特征。
- (2) 基于变形特征假定某一工况或沿某一滑动面的安全系数范围，如滑坡征兆非常明显，二维计算安全系数可假定为 0.95~1.00，而缓慢蠕变滑坡体可假定为 1.00~1.05，如无滑坡征兆，则稳定性在 1.10 以上。
- (3) 在地质参数基础上进行调整，使该滑面所

处的强度能满足假设的稳定性, 然后调整变形参数使得数值计算可以达到弹塑性力学平衡, 以保证开挖、降雨等工况的位移计算准确性。

(4) 采用极限平衡有限元方法搜索最危险滑面、特殊部位的滑面, 分析计算出的安全系数与地质判断是否符合; 同时可利用变形监测数据判断搜索出的滑面是否合理; 利用不同区域、不同工况的安全系数对比判断是否符合假定条件。如符合则表明假设较合理, 如不符合则修改假定重复以上步骤。

(5) 将满足各类条件的岩土力学参数与地质参数、试验参数对比, 综合提出合理的岩土力学计算参数。

采用该流程得出的岩土力学参数可以符合地质判断、稳定性分析要求, 避免了参数主观选取导致计算安全系数小于 1.0 情况, 可以为堆积体治理措施的确定提供有利的支撑。

5 结 论

(1) 滑坡堆积体物质组成结构复杂, 强度较低, 在变形破坏过程中很容易进入塑性破坏。采用刚体极限平衡搜索滑面并用条分法计算安全系数时, 如果滑面上法向力与切向力计算不合理, 则容易产生较大的误差。本文基于数值计算结果探讨了线性规划法滑面搜索方法, 滑面线上各点的应力采用单元内插值得到, 得出的滑面安全系数既与介质强度特性有关, 也与变形特性有关, 由于应力满足力学平衡与几何协调条件, 故比条分法更为合理。

(2) 滑坡堆积体的稳定性一般较低, 当其处于滑动变形状态时往往具有明显征兆, 部分区域已经进入塑性变形状态。故该类介质稳定性分析应充分考虑其滑坡征兆进行大胆假设, 然后采用极限平衡有限元方法计算不同工况下的稳定性, 用不同工况下的滑坡特征进行小心的验证, 得出反映滑坡现象的岩土力学参数范围。与地质参数、试验参数进行对比, 综合得出其合理的岩土力学参数。

(3) 本文采用的改进动态规划算法是极限平衡有限元方法中的一种滑面确定方法, 在溪洛渡水电站左岸谷肩堆积体的稳定性研究中, 不仅其滑面位置与监测资料反映一致, 也能解释该堆积体是复合型多滑动面滑坡的力学机制, 可适用于该类复杂介质分布的均质边坡稳定性分析。

参考文献(References):

- [1] 徐卫亚, 周家文, 邓俊晔, 等. 基于 Dijkstra 算法的边坡极限平衡有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1 159 - 1 172.(XU Weiya, ZHOU Jiawen, DENG Junye, et al. Slope stability analysis of limit equilibrium finite element method based on the Dijkstra algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1 159 - 1 172.(in Chinese))
- [2] BAKER R. Determination of critical slip surface in slope stability computation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1980, 4(4): 333 - 359.
- [3] 曹文贵, 颜荣贵. 边坡非圆临界滑面确定之动态规划法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 320 - 328.(CAO Wengui, YAN Ronggui. A study on dynamic programming to determinate noncircular slip surface of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 320 - 328.(in Chinese))
- [4] PHAM H T V, FREDLUND D G. The application of dynamic programming to slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(4): 830 - 847.
- [5] 冯紫良, 梁朝霞, 戴建国. 复杂受力状态下岩体抗滑移空间稳定性分析[J]. 同济大学学报, 2000, 28(2): 157 - 161.(FENG Ziliang, LIANG Zhaoxia, DAI Jianguo. Stability analysis of cable bridge anchorage in rock masses[J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(2): 157 - 161.(in Chinese))
- [6] 范鹏贤, 朱大勇, 郭志昆, 等. 动态规划法求解边坡安全系数最小上解[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 467 - 470.(FAN Pengxian, ZHU Dayong, GUO Zhikun, et al. The least upper-bound solution for safety factor of slope by dynamic programming[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 467 - 470.(in Chinese))
- [7] 叶海林, 顾宏伟, 刘东升. 基于动态规划和随机有限元的边坡可靠性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 564 - 567.(YE Hailin, GU Hongwei, LIU Dongsheng. Slope reliability analysis using stochastic FEM with dynamic programming method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 564 - 567.(in Chinese))
- [8] 吴海真, 顾冲时. 联合运用改进的极限平衡法和动态规划法分析边坡稳定性[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1 271 - 1 277.(WU Haizhen, GU Chongshi. Slope stability analysis using enhanced limit equilibrium method combined with dynamic programming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1 271 - 1 277.(in Chinese))
- [9] 陈云敏, 李育超, 凌道盛. 蒙特卡洛法与有限元结合搜索边坡临界滑动面[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 75 - 80.(CHEN Yunmin, LI Yuchao, LING Daosheng. Locating critical slip surfaces by a method combining monte carlo technique and FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 75 - 80.(in Chinese))
- [10] CHENG Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(3): 255 - 267.
- [11] GOH A T C. Genetic algorithm search for critical slip surface in multiple edge stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2): 382 - 391.
- [12] DONALD I B, CHEN Z Y. Slope stability analysis by upper bound approach: fundamentals and methods[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 853 - 862.
- [13] 夏健明. 四结点单元应力云图的一种生成方法[J]. 计算机工程与设计, 2004, 25(5): 844 - 845.(XIA Jianming. Method for forming stress nephogram of four-node elements[J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(5): 844 - 845.(in Chinese))