

# 无明显滑面岩质边坡危险滑移路径搜索

熊 段 建

(株洲市规划设计院, 湖南株洲 412007)

**【摘 要】** 对无明显滑面岩质边坡危险滑移路径的搜索算法进行了改进研究, 提出以总抗滑储备密度最小为判据的动态规划方法来确定边坡的危险滑移路径及其安全系数大小的方法, 并通过算例得到了验证。

**【关键词】** 岩质边坡; 有限元法; 危险滑移路径; 动态规划方法

**【中图分类号】** TU 457

## Search of Dangerous Slide Path of the Rock Slope Without Obvious Slide Surface

Xiong Chong Duan Jian

(Zhuzhou Planning & Designing Institute, Zhuzhou Hunan 412007 China)

**【Abstract】** The algorithm of searching dangerous slide path of the rock slope without obvious controlling discontinuities is improved, and the method of adopting dynamic planning method which is based on the criterion of minimum slide-resisted reserve density to confirm dangerous slide path is proposed. The safety coefficient of slope is verified by an example.

**【Key Words】** rock slope; finite element method; dangerous slide path; dynamic planning method

### 0 引言

对于无明显滑面岩质边坡, 我们可以基于岩体实际结构面网络图形, 运用有限元进行数值分析, 得到工程区域内各点的位移、应力、应变等具体数值, 同时还可利用有限元强度折减法或超载法求得边坡的安全系数。然而, 采用该方法得到的安全系数仅仅只是一种抽象的数值, 至于边坡潜在危险滑移路径的具体方位、几何特征却一概未明。因此我们有必要基于有限元的计算结果作进一步的研究分析, 定量评价无明显滑面岩质边坡稳定程度大小, 同时搜索工程区域内危险滑移路径, 从而为无明显滑面岩质边坡工程的加固防护提供科学依据和施工指导。

基于有限元计算结果, 运用 Lajtai、Einstein 理论及摩尔-库仑强度准则, 我们可以求得无明显滑面岩质边坡任意滑移路径的安全系数大小, 通过数值对比分析, 找出最小的安全系数及其对应的滑移路径, 该滑移路径即为边坡的危险滑移路径。然而岩体结构面网络极其复杂, 形成多条可能滑移路径, 要想计算所有滑移路径的安全系数大小, 简直是天方夜谈, 根本难以实现。针对此问题, 文献[1]基于 Dijkstra 最短路径算法原理提出了以总抗滑储备(总抗滑力与总下滑力之差)最小为判据的危险滑移路径搜索算法, 然而基于边坡安全系数的定义我们应

该看到滑移路径总抗滑储备最小并不一定该路径安全系数最小, 从数学的角度来说两数之差最小不一定此两数之比最小。比如:  $5-2=3 < 7-3=4$ ,  $\frac{5}{2}=2.5 > \frac{7}{3}=2.333$ 。显然该算法存在一定的弊端, 有待进一步地改进。

### 1 动态规划方法基本理论

动态规划方法<sup>[2]</sup>最早由美国数学家 R·Bellman 于 1951 年提出的, 它是求解某类问题的一种方法, 是考察问题的一种途径, 而不是一种特殊算法。从求解过程来看, 它是一种多阶段决策过程, 路线网络问题可以采用该方法来计算(见图 1), 以该问题来说明动态规划方法的一些基本概念。

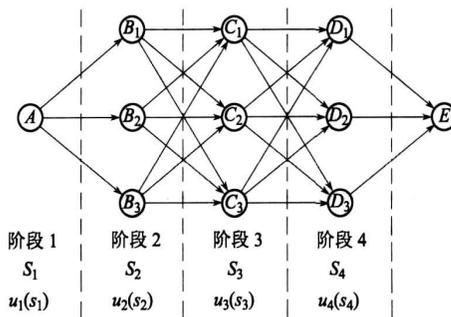


图 1 线路有向网络图

### 1) 阶段

把所给问题的过程,恰当地分为若干个相互联系的阶段,以便能按一定的次序去求解。描述阶段的变量称为阶段变量,常用表示  $k$ ,可分为 4 个阶段来求解,  $k = \{1, 2, 3, 4\}$  (见图 1)。

### 2) 状态

状态表示每个阶段开始所处的自然状况或客观条件,它描述了研究问题过程的状况。描述过程状态的变量称为状态变量,它可用一个数、一组数或一向量来描述,常用  $s_k$  表示第  $k$  阶段的状态变量。在图 1 线路网络中,第二阶段有三个状态,状态变量  $s_2 = \{B_1, B_2, B_3\}$ 。

### 3) 决策

决策表示当过程处于某一阶段的某个状态时,可以作出不同的决定,从而确定下一阶段的状态。描述决策的变量,称为决策变量,它可用一个数、一组数或一向量来描述,常用  $u_k(s_k)$  表示第  $k$  阶段当状态处于  $s_k$  时的决策变量,它是状态变量的函数,其值往往限制在某一范围之内,此范围称为允许决策集合  $D_k(s_k)$ ,显然有  $u_k(s_k) \in D_k(s_k)$ 。图 1 网络中,第二阶段状态  $B_1$  就可作出三种不同的决策,因此有:  $u_2(B_1) \in D_2(B_1) = \{C_1, C_2, C_3\}$ 。

### 4) 状态转移方程

状态转移方程是确定过程由一个状态到另一个状态的演变过程,若给定第  $k$  阶段状态变量  $s_k$  的值,该段的决策变量  $u_k$  一经确定,第  $k+1$  阶段的状态变  $s_{k+1}$  的值也就完全确定,  $s_{k+1}$  为  $s_k, u_k$  的函数,此函数关系称为状态转移方程。对于图 1 路径问题,其状态转移方程为  $s_{k+1} = u_k(s_k)$ 。

### 5) 最优值函数

用来衡量所实现过程优劣的一种数量指标的最优值,常用  $f_k(s_k)$  表示,它表示从第  $k$  阶段的状态  $s_k$  开始到第  $n$  阶段的终止状态的过程,采取最优策略所得到的最优值。图 1 路径问题,基于逆序解法原理,得出其最优值函数。

$$\begin{cases} f_k(s_k) = \min_{u_k \in D_k(s_k)} \{d_k(s_k, u_k(s_k)) + f_{k+1}(u_k(s_k))\} \\ k = \{4, 3, 2, 1\} \\ f_5(s_5) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $d_k(s_k, u_k(s_k))$  为两点间的距离。

## 2 无明显滑面岩质边坡危险滑移路径搜索

应用动态规划方法搜索无明显滑面岩质边坡的危险滑移路径时,由某一初始基准结构面为初始步所形成的系列滑移路径可以看成一有向路径网络图,其中顶点集合由所有可能被包含在滑移路径上的结构面的端点组成,边集合由结构面端点之间连线组成,连线代表结构面或岩桥。对同一起、终点路径网络,采用动态规划逆序解法求解,其状态转移方程为  $s_{k+1} = u_k(s_k)$ ,最优值递推关系函数为

$$f_k(s_k) = \min_{u_k \in D_k(s_k)} \left\{ \frac{R_k - T_k + f_{k+1}(u_k(s_k)) \sum_{i=k+1}^n L_i}{L_k + \sum_{i=k+1}^n L_i} \right\} \quad (2)$$

其中:  $(T_k - T_k)$ 、 $L_k$  分别为状态变量  $s_k$  与决策变量  $u_k(s_k)$  两点之间抗滑储备及路径长度大小,当两点之间为岩桥时,  $L_k = d_k$ 。

对具体的无明显滑面岩质边坡问题,大致确定其危险滑移路径,须经历以下几步。

1) 对指定的工程区域,确定满足一定条件的初始基准结构面的条数。

2) 对每一初始基准结构面,基于动态规划方法进行分析计算,得出最小的安全系数及其对应的滑移路径。

3) 通过对所有的初始基准结构面的最小安全系数的数值对比,寻找最最小的安全系数及其对应的滑移路径,该路径即为无明显滑面岩质边坡的危险滑移路径。

## 3 算例分析

一岩质边坡,坡高  $H=60$  m、坡角  $\beta=70^\circ$ ,边坡岩体及结构面物理力学参数见表 1,分析计算区域: 竖直方向取 2 倍坡高,水平方向取 4 倍坡高,见图 2。

表 1 计算采用的材料参数

名称	倾角/ $^\circ$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 $c/\text{MPa}$	摩擦角 $\varphi/^\circ$
岩体		5 700	0.26	2 400	0.65	32
结构面 $J_1$	20	1 500	0.27	2 200	0.20	30
结构面 $J_2, J_4$	30	1 500	0.27	2 200	0.18	35
结构面 $J_3, J_5$	60	1 500	0.27	2 200	0.15	31

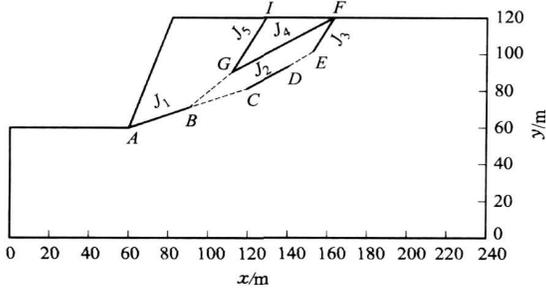


图2 边坡计算剖面

采用有限元软件对其进行分析,模型边界条件为:地表及坡面为自由边界,不受任何约束;模型底部边界受到垂直方向的位移约束;模型左右边界分别受到水平方向的位移约束。单元类型:岩体采用平面 Plane42 单元,结构面则采用接触对 (contact172 和 target169) 来考虑,共划分 590 个单元、553 个节点,见图 3。经有限元 Ansys5.7 软件计算,各结构面法向应力  $\sigma_n$  及剪应力  $\tau_s$  分别见图 4 和图 5。

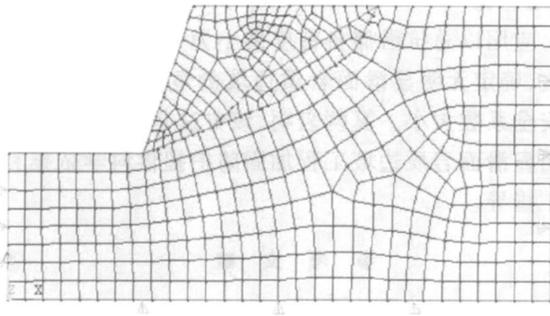
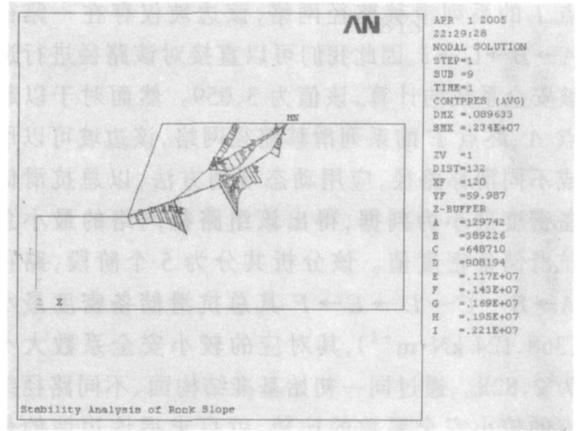
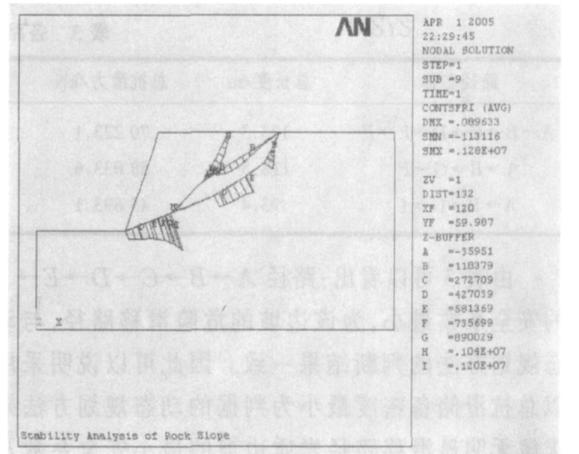


图3 有限元计算模型

图4 结构面法向应力  $\sigma_n$ 图5 结构面剪应力  $\tau_s$ 

根据岩体结构面网络图形及边坡滑移路径的搜索原理,经分析可知,该边坡算例存在三条滑移路径: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$ 、 $A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow F$ 、 $A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow I$ 。基于边坡有限元应力场结果数据,通过利用 Ansys5.7 路径工具菜单,对岩桥进行破坏形态的判断,同时对各结构面及岩桥沿路径进行应力数值积分得到抗滑力、下滑力及抗滑储备大小,结果见表 2。

表2 结构面及岩桥结果数据

计算内容	长度/m	破坏形态	抗滑力/kN	下滑力/kN	抗滑储备/kN	
结构面	$J_1$	32.118 3	抗剪破坏	25 794.4	13 795.8	11 998.6
	$J_2$	24.276 1	抗剪破坏	22 656.9	7 254.9	15 402.0
	$J_3$	21.492 8	抗剪破坏	4 793.7	3 297.1	1 496.6
	$J_4$	59.312 3	抗剪破坏	23 586.5	2 893.1	20 693.4
	$J_5$	34.243 9	抗剪破坏	11 446.0	3 691.2	7 754.8
岩桥	BC 段	30.707 8	抗剪破坏	10 269.4	-2 515.7	12 785.1
	BG 段	27.020 3	抗剪破坏	8 652.7	-2 485.9	11 138.6
	DE 段	14.720 5	抗剪破坏	6 708.7	2 995.6	3 713.1

由此我们就可以在确定的滑移路径的基础上,绘制边坡滑移路径有向网络图见图 6。由图 6 可

知,该边坡仅仅存在一条初始基准结构面  $J_1$ ,在坡顶边界存在两个路径终点  $F$ 、 $I$ 。对于以起点  $A$ 、终

点 I 的系列滑移路径网络,该边坡仅存在一路径  $A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow I$ 。因此我们可以直接对该路径进行边坡安全系数的计算,该值为 3.059。然而对于以起点 A、终点 F 的系列滑移路径网络,该边坡可以形成不同滑移路径,应用动态规划方法,以总抗滑储备密度最小为判据,得出该组路径网络的最小总抗滑储备密度值。该分析共分为 5 个阶段,路径  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$  其总抗滑储备密度最小 ( $368.124 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ),其对应的较小安全系数大小为 2.828。通过同一初始基准结构面、不同路径终点的较小安全系数的比较,就可求得该边坡的最小安全系数,为 2.828,由此得知该边坡的危险滑

移路径为路径  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$ 。

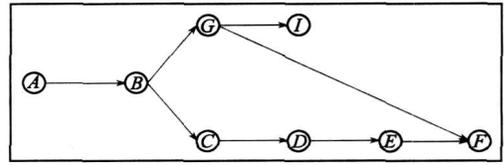


图 6 边坡滑移路径有向网络图

为了验证路径  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$  是否为该边坡的危险滑移路径,基于该边坡滑移路径比较简单,现对另两条滑移路径进行计算,以利于各路径的对比分析,结果见表 3。

表 3 各路径的结果对比分析

路径名称	总长度/m	总抗滑力/kN	总下滑力/kN	总安全储备/kN	总安全储备密度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	安全系数
$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$	123.3	70 223.1	24 827.7	45 395.4	368.124 0	2.828
$A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow F$	118.5	58 033.6	14 203.0	43 830.6	370.031 8	4.086
$A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow I$	93.4	45 893.1	15 001.1	30 892.0	330.811 4	3.059

由表 3 可以看出:路径  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$  的安全系数最小,为该边坡的危险滑移路径,与动态规划方法的判断结果一致。因此可以说明采用以总抗滑储备密度最小为判据的动态规划方法来求解无明显滑移路径岩质边坡的最小安全系数及其危险滑移路径是可行的。然而当我们采用以总抗滑储备最小为判据的 Dijkstra 最短路径算法对该边坡进行分析时,由表 3 可知,路径  $A \rightarrow B \rightarrow G \rightarrow I$  其总抗滑储备最小 ( $30 892 \text{ kN}$ )。由此可以推断该路径为边坡的危险滑移路径,但经安全系数的计算该路径并不是安全系数最小的危险滑移路径,其安全系数 3.059,明显大于路径  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$  的安全系数。因此说明该算法存在一点的弊端,有待改进。

对该问题还采用了有限元强度折减方法进行边坡稳定性分析。结果表明该边坡的安全系数为 2.796,与路径  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$  的安全系数

值比较接近,进一步说明了以总抗滑储备密度最小为判据的动态规划方法来求解无明显滑移路径岩质边坡的最小安全系数及其危险滑移路径是合理的。

#### 4 结论

应用以总抗滑储备密度最小为判据的动态规划方法,确定无明显滑面岩质边坡的危险滑移路径及其安全系数大小。算例表明,该方法是可行的,可为无明显滑面岩质边坡工程加固防护提供科学依据和施工指导。

#### 参 考 文 献

[1] 单衍景. 岩体宏观力学参数的多尺度计算与岩体边坡稳定性分析的数值方法[D]. 北京:中国科学院, 2002.  
 [2] 甘应爱,田 丰,李维铮,等. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

收稿日期:2007-03-22

### 《岩土工程技术》征订

《岩土工程技术》创刊于 1987 年,是国内外公开发行的工程技术学术刊物,刊登岩土工程各学科的学术论文。2006 年入选“中国科技核心期刊”及“中国科技论文统计源期刊”。

本刊双月刊,每期 56 页,共约 10 万字,每期定价 10.00 元,全年 60.00 元。可随时与本杂志社联系订阅。

另,本刊尚有少量过刊及往年合订本,需要者可与本杂

志社联系。

联系地址:北京市宣武区西便门内大街 79 号北京 573 信箱  
 邮 编:100053

电 话:(010)83164702 (010)63038601-2263

传 真:(010)63017582

电子邮箱:get099@263.net

《岩土工程技术》杂志社

2007-08-08