

# 从岩石力学系统运动稳定性研究滑坡问题\*

王来贵 黄润秋

(成都理工学院工程地质研究所 成都 610059)

**摘要** 从岩石力学系统运动稳定性的基本理论出发,将边坡力学系统的破坏分成五类,对其中的连续协调变形边坡的稳定性问题进行了描述,并分析了该系统的稳定性及其判据,找出了系统的控制变量是系统的广义刚度系数,同时对影响系统控制变量的因素进行了初探,指出影响边坡系统稳定性的控制变量主要是系统的几何结构因素和系统的力学参数性质,最后提出对系统控制变量进行人为的调控,达到调整系统、加强系统稳定性和防灾的目的。

**关键词** 岩石力学系统 运动稳定性 滑坡 失稳

岩石或岩体及在其中开挖、回填、支护形成的结构体,在地应力等因素的相互作用下,与围岩、支护和工程地质、自然环境共同组成了一个系统,该系统是由若干个子系统或分系统组成,每个子系统具有各自本身的特性,而子系统组成的总系统又具有整体的功能特性<sup>[1~3]</sup>。岩石力学系统运动稳定性理论的主要研究任务是从系统运动这个广义的概念出发,建立描述岩石变形、破坏、滑动等稳定性问题的模型,提出岩石力学系统运动稳定性的判别条件,找出影响岩石力学系统运动稳定性的主要因素,探讨系统中子系统的结构功能及相互作用原理,找出影响系统稳定性的控制参量,同时对工程地质力学系统失稳灾害进行预测、预报、评价及提出防治措施。

边坡力学系统作为岩石力学系统的一种,当然具备力学系统<sup>[4]</sup>和岩石力学系统具有的一般特性和规律,同时可采用岩石力学系统运动稳定性的理论对边坡力学系统的运动稳定性进行研究。本文就边坡力学系统运动稳定性问题进行探讨。

## 1 边坡力学系统稳定性分类

从完整连续到滑动结束分析整个滑坡全过程,结合岩石破坏的机理,边坡的失稳破坏可从连续型边坡的变形失稳和沿不连续面滑动两个主要方面考虑,主要分为以下几种破坏形式:

1. 边坡几何大变形发生的失稳。主要是三维几何尺寸相差悬殊的如顺倾滑坡和直立型边坡的倾倒,其特点是系统失稳时并无达到岩石的强度极限;

2. 变形连续型的边坡的强度不足而发生的稳定破坏。边坡的很多强度破坏都属于此类,其特点是系统破坏前的变形连续协调,系统破坏过程中边变形边破坏,系统并无储存的弹性能量释放。主要有层间的剪切强度不够而发生的错动,抗拉强度不够而发生的拉破坏及抗压强度不足而发生的压破坏;

\* 国家杰出青年科学基金资助(项目号:49525204)。

收稿日期:1997-02-12。

3. 变形连续型的物理非线性诱发的失稳. 边坡的一般的变形失稳都属于此类,其特点是系统已经达到强度极限后,系统失稳时释放大量的弹性能,系统失去了原来的结构功能特性;

4. 含有明显不连续面的边坡不稳定滑动. 主要是已经破坏的边坡沿着主滑面滑动,其特点是在滑动过程中,阻尼力随滑动速度的增加而减小,产生负阻尼,即滑动越来越快,越来越偏离原来的位置和失去原来的运动状态;

5. 边坡中部分块体沿坡面的不稳定滚动. 主要是已经破坏的边坡中的二次或再次破坏后形成的块体沿坡面的滚动,其特点是非稳定滚动,越滚越快,直到块体受阻停止.

## 2 边坡力学系统模型及运动规律描述

各种类型的滑坡,由于失稳的机制不同,用以描述其运动规律的模型和方法也不同. 本文就边坡连续变形的稳定性问题进行描述. 如图 1 所示,一边坡的上端已出现拉裂,假设破裂面为 ABC,并将滑体划分为若干块,每一块体为一个子系统. 为了讨论方便,选三个块体依次为子系统 1、子系统 2、子系统 3,共同在一个斜面上变形,其质量分别为  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ . 在等效加载过程中,外力是不断变化的,在某一点保持动态平衡. 则在  $\Delta t$  时间段内,设  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为三个子系统的在时刻  $t$  时的广义刚度系数,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  分别为三个子系统的在时刻  $t$  时的广义阻尼系数,并为常量,为局部线性问题,如图 2 所示. 选  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  分别为三个子系统的广义坐标,则由三个子系统组成的总系统的变形规律可近似地用线性微分方程组描述如下

$$\begin{cases} M_1 \ddot{X}_1 + D_1 \dot{X}_1 + K_1 X_1 - K_2 (X_2 - X_1) = P_1 \\ M_2 \ddot{X}_2 + D_2 \dot{X}_2 + K_2 (X_2 - X_1) - K_3 (X_3 - X_2) = P_2 \\ M_3 \ddot{X}_3 + D_3 \dot{X}_3 + K_3 (X_3 - X_2) = P_3 \end{cases} \quad (1)$$



图 1 边坡示意图

Fig. 1 The schematic drawing for slope

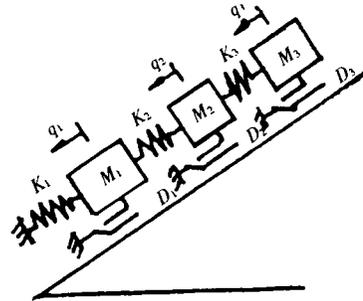


图 2 三个子系统组成的边坡总系统

Fig. 2 The system consists of three subsystems

矩阵形式微分方程组可表达如下:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [D]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{P\} \quad (2)$$

式中块体的质量组成了质量矩阵  $[M]$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

广义阻尼系数组成阻尼矩阵[D]

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

广义刚度系数组成刚度矩阵[K]

$$[K] = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & 0 \\ -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 \\ 0 & -K_3 & K_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

加速度矩阵{\ddot{X}}

$$\{\ddot{X}\} = \{ \ddot{X}_1 \quad \ddot{X}_2 \quad \ddot{X}_3 \}^T \quad (6)$$

速度矩阵{\dot{X}}

$$\{\dot{X}\} = \{ \dot{X}_1 \quad \dot{X}_2 \quad \dot{X}_3 \}^T \quad (7)$$

位移矩阵{X}

$$\{X\} = \{ X_1 \quad X_2 \quad X_3 \}^T \quad (8)$$

荷载矩阵{P}

$$\{P\} = \{ P_1 \quad P_2 \quad P_3 \}^T \quad (9)$$

### 3 边坡力学系统的稳定性判据及控制变量

从线性微分方程组的解的稳定性理论可以导出,在广义阻尼矩阵[D]为正定的条件下,如果广义刚度矩阵[K]是正定的,微分方程组的解是稳定的,同时边坡子系统是稳定的,即边坡子系统不破坏或稳定破坏.属于强度问题.方程组(2)失稳的条件是广义刚度矩阵[K]为非正定.在公式(5)中,广义刚度矩阵[K]为非正定的意义体现在,如果仅有第一行列的对角元素

$$K_1 + K_2 \leq 0 \quad (10)$$

与子系统 1 或子系统 2 有关的微分方程组的解是不稳定的.在外界的干扰下子系统 1 或子系统 2 失稳,如果仅有第二行列的对角元素

$$K_2 + K_3 \leq 0 \quad (11)$$

与子系统 2 或子系统 3 有关的微分方程组的解是不稳定的.在外界的干扰下子系统 2 或子系统 3 失稳,如果仅有第三行列的对角元素

$$K_3 \leq 0 \quad (12)$$

与子系统 3 有关的微分方程组的解是不稳定的.在外界的干扰下子系统 3 失稳.如果(10)~(12)式中左侧的绝对值越大,系统失稳的程度就越大.

从(10)~(11)式可以看出,在连续协调的边坡力学系统中,各子系统间相互作用,每一个子系统的稳定性都与其周围的各个子系统的稳定性相互关联.控制这种演化过程和

保持系统原来结构功能特性的控制变量就为系统的广义刚度系数, 在多维系统中为广义刚度矩阵. 广义刚度系数矩阵的性质, 决定了描述边坡力学系统模型微分方程组解的稳定性性质, 当然同时决定了边坡力学系统破坏与否及其稳定性. 边坡系统中任何一个或几个子系统的失稳, 都会改变原来系统的结构功能和特性. 系统在各种因素的作用和影响下进行演化, 失稳后形成新的系统.

#### 4 边坡力学系统控制变量的影响因素

边坡系统中, 影响控制变量的因素可从两个主要方面来考虑. 一是对系统的几何结构因素的影响, 即结构信息; 二是对系统物理力学性质的影响, 即参数信息. 系统的几何因素主要是系统的形状、结构布置、及子系统间的排列组合. 故对边坡加固时, 首先要优化子系统的配置, 使形成的新系统在几何上更加合理, 稳定度更高. 系统的物理力学性质方面, 要从增加各子系统间的完整性和加强各子系统的自身的稳定性出发, 如水对岩石特别是水对软岩的力学性质的影响, 振动对岩石完整性及力学性质的影响等. 如图 1 中, 要使总系统稳定, 每一个子系统必须稳定, 同时要兼顾相邻子系统的作用. 从(10)、(11)式可进一步看出, 提高某一子系统的稳定性, 对提高整个系统的稳定性是有利的. 如提高子系统 2 的稳定性, 即  $K_2$  为正, 并且越大, 满足(10)、(11)式的可能性就越小, 总系统的稳定程度增加.

#### 5 结 论

从上面的分析可得如下结论:

1. 从岩石力学系统运动稳定性的基本理论出发, 建立滑坡问题的模型和微分方程组描述, 是一个可行的方法.
2. 采用简单的模型, 对边坡连续变形的稳定性问题进行描述, 寻求边坡力学系统失稳条件和判据, 系统的控制变量是系统的广义刚度系数矩阵. 依据这种分析方法, 对实际问题进行讨论时, 可利用有限元法细化单元研究.
3. 影响边坡系统稳定性的控制变量, 主要是系统的几何结构因素和系统的力学性质的影响. 进而分析影响系统稳定性的控制变量, 对系统控制变量进行人为的调控, 达到调整系统加强系统稳定性的目的, 这是一种新的思路.

#### 参 考 文 献

- [1] 王来贵, 黄润秋, 张倬元等. 岩石力学系统运动稳定性问题及研究现状. 地球科学进展, 1997, 12(3): 235~240.
- [2] 于学馥, 于加. 岩石力学新概念与开挖结构优化设计. 北京: 科学出版社, 1995, 45~53.
- [3] 魏宏森, 宋永华. 开创复杂性研究的新学科. 成都: 四川教育出版社, 1991. 2, 30~70.
- [4] 秦元勋. 运动稳定性理论与应用. 北京: 科学出版社, 1981, 60~92.
- [5] 陈学忠, 尹祥础. 非线性科学在地震研究中的一些应用. 地球物理学进展, 1994, 9(1): 100~109.
- [6] Nur. A., Nonuniform friction as a physical basis for earthquake mechanics, PAGEOPH., 1987, 116(4/5): 964~989.
- [7] 王来贵, 王泳嘉. 岩石试件的流变失稳理论及判据. 阜新矿业学院学报, 1994, 17(3): 42~47.

# THE STUDY ON THE SLOPE STABILITY PROBLEM BY ROCK MACHANICAL SYSTEM STABILITY OF MOTION

Wang Laigui Huang Runqiu

(*Engineering Geology Institute of Chengdu Institute of Technology*).

## Abstract

In this paper, five types of slope failure was presented, based on the theory of rock mechanical system stability of motion, of which the compatibility continuous deformation slope is described, its stability analyzed and the criterion deduced, authors point out that general stiffness matrix is the control variate of slope system, at the same time the affect factors is probed for the control variate, the affects factors are the geomatric behavior for the system structral and the mechanical parameter. In the end people can adjust the control variate to adjust the rock mechanical system and strength the system stability as well as prevent lanslide.

**Key Words** rock-machanics system, the stability of motion, landslide, instability

## 《山地研究》编委会召开在蓉编委会议

1997-12-25《山地研究》编委会在成都山地灾害与环境研究所召开在蓉编委会议。会议由《山地研究》主编钟祥浩研究员主持。主管副所长刘世建研究员参加了会议。会上编委们回顾和总结了过去的工作,并讨论了新形势下的办刊方针和任务。大家认为《山地研究》应在以下几方面加强工作:

1. 关于《山地研究》的学术定位,应继续坚持综合性学术刊物的办刊方针,突出山地科学特色。重点在于加强学术性,严把质量关;注重科学性,鼓励创新;
2. 适应信息时代要求,加快稿件处理速度,缩短出版周期。为此改手写稿为打印稿(软盘)投稿;
3. 按时出刊,不拖期,不误期;
4. 开展评选优秀论文活动;
5. 强化编委会职能,加强读者、作者、编者联系,共同办好《山地研究》。

此外,鉴于原副主编姚德基编审退休,补选了余大富研究员为常务副主编,并增选了刘世建研究员为编委。

《山地研究》编委会