

岩石试件沿弱面滑动的动力学分析^①

王来贵 黄润秋 张倬元 王士天
(成都理工学院工程地质研究所, 成都 610059)

王泳嘉
(东北大学, 沈阳 110006)

摘 要 含有不连续面的岩石力学系统, 在沿不连续面的滑动过程中, 其响应结果与滑动的位移、滑动的速度密切相关。该文对此现象进行了理论分析, 指出在一定的滑动速度范围内, 滑体随着滑动位移的积累, 滑动速度发生突变。

关键词 不连续面 岩石试件 突变 负阻尼

岩石工程中, 有大量沿原生、次生或后生不连续面滑动破坏的现象。在滑动过程中, 有的滑体缓慢地长期滑动, 有的突然剧烈滑动, 有的在滑动时伴随着强烈振动。这就提出了在滑动过程中滑动是否稳定的问题。文献[1, 2]已用实验进行了初步的研究, 证实在滑体滑动过程中, 阻尼力与运动过程有关, 其量值大小及方向决定了滑体滑动的稳定性, 本文将从理论上对该过程进行探讨。

1 实验模型及主要结果

滑体滑动时, 与基岩等组成岩石力学系统。实验装置模型如图1。实验中, 滑体质量为 M , 用刚度系数为 K 的弹簧来模拟滑体在滑面上的变形, 用皮带运动来模拟滑体与基底间的相对运动。每一方案中, 皮带速度 v 均为一常量。

试件系统在相对滑动前, 弹簧仅有变形,

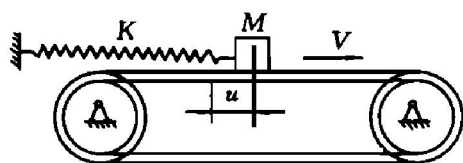


图1 实验装置模型图

由接触面间的摩擦作用产生的阻尼力逐渐增加, 滑体的阻尼力的方向与皮带运动速度的方向一致, 见图2中 OA 段, A 点为由变形到滑动状态的临界点, 此刻弹簧变形位移为 u_0 , 阻尼力为最大值。超过 A 点后, 滑块就突然滑动, 释放由弹簧压缩而积累的能量, 如图中 AB 段。 B 点为滑动终止点, 此刻滑动相对速度为零。如果再继续运动, 试件会发生变形直到运动的全过程结束。图3为相对滑动速度一定时测得的阻尼力, 其中 G , G_0 分别为所测的阻尼力和最大阻尼力。图中在一定的滑动速度范围内, 阻尼力是速度的非线性函数, 滑块的摩擦强度随相对滑动速度的增加而降低, 即负阻尼现象。相对滑动速度较低时, 由弹簧释放

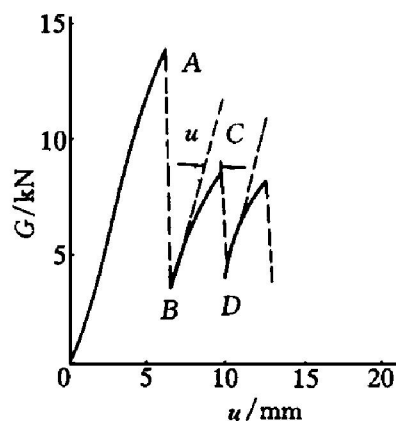


图2 滑块的阻力与位移之间的关系

① 国家杰出青年科学基金(49525204)和煤炭部跨世纪学术带头人培养基金资助项目

收稿日期: 1996-08-26; 修回日期: 1997-06-24 王来贵, 男, 33岁, 副教授, 博士

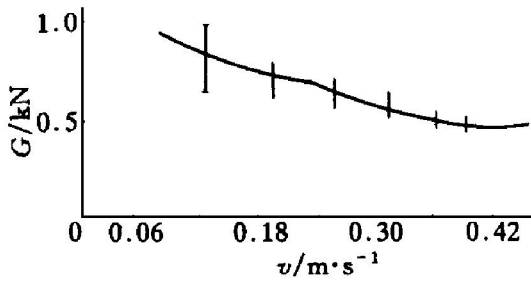


图3 不同滑动速度时的摩擦阻力

其所储存的能量而产生的应力降较大, 周期长; 相对滑动速度较高时, 应力降较小, 周期短, 应力降随速度的增加而减小。

2 滑动系统滑动规律的描述

设皮带运动速度是 v , 滑块的绝对滑动位移和速度分别为 u 、 $\dot{u}$, 且 $u = 0$ 为测试弹簧未变形的位罝; K 不变, 则滑块的相对滑动速度为:

$$\zeta = \dot{u} - v \quad (2)$$

设 $G(\dot{u} - v, u)$ 为由于相对速度、位移引起的阻尼力。当 $\dot{u} > v$ 时, 滑块所受的阻尼力与皮带运动的速度相反; 当 $\dot{u} < v$ 时, 滑块所受的阻尼力与皮带运动的速度相同。滑块系统的滑动规律可用微分方程来描述:

$$M\ddot{u} + Ku = -G(\dot{u} - v, u) \quad (3)$$

式中 $G(\dot{u} - v, u)$ 是滑块相对滑动速度 ζ 及位移 u 的非线性函数。设 u_0 为滑体临界平衡点, 则

$$u_0 = -\frac{G(-v, u)}{K} \quad (4)$$

如以 u_0 为新坐标原点, 消除由皮带运动而引起的刚体位移, 令

$$w = u - u_0 \quad \text{或} \quad u = w + u_0 \quad (5)$$

则(5)式有

$$\dot{u} = \dot{w}, \quad \ddot{u} = \ddot{w} \quad (6)$$

$$u_0 = -\frac{G(-v, w)}{K} \quad (7)$$

代入方程后得到

$$M\ddot{w} + Kw + Ku_0 = -G(\dot{u} - v, w) \quad (8)$$

如果位移 w 为一常量, 将函数 $G(\dot{u} - v, w)$ 在 $\dot{u} = 0$ 处展开成泰勒级数

$$G(\dot{u} - v, w) = G(-v, w) + \dot{u}G'(-v, w) + \frac{1}{2}\dot{u}^2G''(-v, w) + \dots$$

取级数的线性部分, 即成

$$G(\dot{u} - v, w) = G(-v, w) + \dot{u}G'(-v, w) \quad (9)$$

将式(6)代入式(9), 则运动方程式(8)可写为

$$M\ddot{w} + G'(-v, w)\dot{w} + Kw = 0 \quad (10)$$

在相对滑动速度为常量时, 阻尼力是滑动速度和位移的耦合函数, 阻尼系数为

$$G'(-v, w) = \beta(w^2 - b) \quad (11)$$

式中 β 、 b 为待定系数, 即

$$M\ddot{w} + \beta(w^2 - b)\dot{w} + Kw = 0 \quad (12)$$

式(12)可描述滑体系统相对速度为常量时的运动规律。

3 滑动系统稳定性的理论分析

式(12)可变为

$$\ddot{w} + \frac{\beta}{M}(w^2 - b)\dot{w} + \frac{K}{M}w = 0 \quad (13)$$

设 $z = \frac{M}{\beta}w$, 则

$$z = \frac{M}{\beta} \int_0^t w dt + w_0 \quad (14)$$

式中 z 的意义是在滑体质量 M 及参数 β 一定时, 系统滑动位移随时间积累, 则式(13)有

$$\dot{w} = -\frac{\beta}{M} \left(\frac{1}{3}w^3 - bw - \frac{K}{M}z \right) \quad (15)$$

当 $\frac{\beta}{M}$ 很大时, 系统为大阻尼, w 的变化率比 z 的变化率大得多, 可以把 z 看成确定 w 性态的一个参数, 式(14)为“慢”方程, 式(15)为“快”方程。“快”方程的特点是在一定的范围内阻尼大, 衰减快; “慢”方程的特点是左右相变的参量变化很慢, 但它主宰着系统演化的整个过程, 决定着系统演化结果及其结构和功能。位移 w 的动态平衡点集由方程

$$\frac{1}{3}w^3 - bw - \frac{K}{M}z = 0 \quad (16)$$

给出, 这样式(16)就变成由 b 、 z 为控制变量、 w 为状态变量的尖点突变模型, 见图4。图中如果 $w^2 > b$, 滑动系统为正阻尼, 上下两页为吸引子; 如果 $w^2 < b$, 滑动系统为负阻尼, 代表中间的一叶, 为不稳定的滑动; 在 $w^2 = b$, 滑动系统处于转折点, 即图4中为两个拐点 A 、 B 。

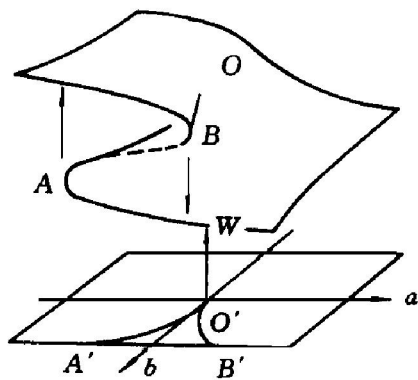


图4 不同的相对滑动速度对应的尖点突变模型

张弛振动或自激振荡。在离位相图中心点 O 的距离代表着系统机械能的大小, 最近和最远点都发生在 $w^2 = b$ 上。在一定的范围内, 随着滑块的绝对速度不断增加, 系统的机械能反而衰减, 这种现象就是负阻尼, 即 E 衰减部分。文献[2]介绍了含有不连续面滑动的实验结果, 与理论分析接近。图6是在 $\beta = 4$, b 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 时, 滑动系统的位相图。由图可看出, 随着 b 值的增加, 突变值变大, 对应着相对滑动速度逐渐降低的实验过程。

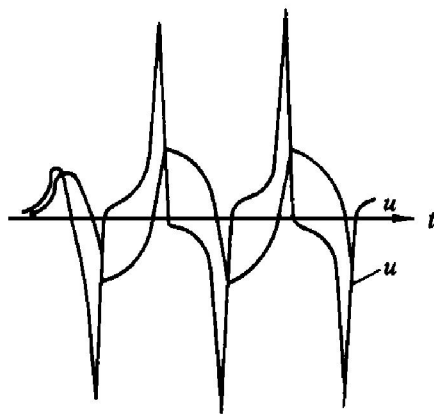


图5 $b = 0.6$ 、 $\beta = 4.0$ 的位移、速度随时间变化图

4 滑动系统稳定性的数值分析

图5是根据 $b = 0.6$, $\beta = 4.0$ 时式(16)的近似解绘制的位移、速度随时间变化图。图中慢变量滑动位移的积累 z 的变化是连续的, 在往复运动中, 位移图的拐点过后的 A 点, 位移随时间的变化是缓慢连续渐变的, 但诱发的滑动速度的变化却是突发的。在一个周期内, 系统的能量有大有小, 有耗散同时又有补给, 即

5 结论

(1) 对非完整含有不连续面的岩石试件, 当应力超过某一阈值后, 就产生沿断层的滑动。模拟试验表明, 当滑块相对速度在一定的范围内增加时, 滑块-弹簧系统就会发生能量积累-释放过程, 在正压力、接触面间静止时间一定的条件下, 与相对滑动速度的大小有关。

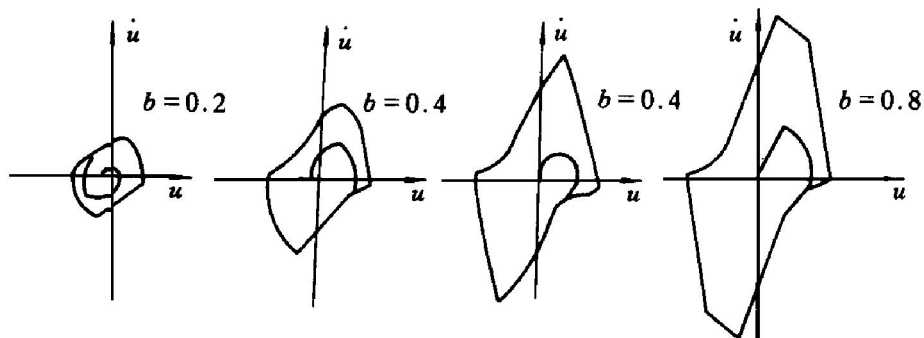


图6 $\beta = 4$, b 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 时滑动系统的位相图

(2) 在一定速度范围内, 随着滑块相对滑动速度的增加, 系统的阻尼力减小, 产生负阻尼。

(3) 理论分析可知, 在强阻尼非线性系统中, 可产生自激振荡, 其过程是滑动系统缓慢地储存能量, 当达到临界状态时, 突然瞬时全部释放能量。造成突变。

(4) 不同的 b 值代表着不同的相对速度,

从滑动系统的位相图可明显地看出, 随着 b 值的增加, 突变值变大。对应着相对滑动速度逐渐降低的实验过程。

参考文献

- 1 Nur A. Pageoph, 1978, 116(4, 5): 964– 989.
- 2 王思敬, 张菊明. 地质科学, 1982(2): 162– 170.

THEORETIC ANALYSIS ON SLIPPING STABILITY OF ROCK SAMPLE MACHANICS SYSTEM

Wang Laigui, Huang Runqiu, Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian

Engineering Geology Institute of Chengdu Institute of Technology, Chengdu 610059

Wang Yongjia

Northeastern University, Shenyang 110006

ABSTRACT The responding result of a rock machanics system, which contains discontinuous faces, is related closely to the displacement and velocity of sliding. This phenomenon has been analysed in the paper and a viewpoint is put forward, that is, in a certain range of relative slipping velocity, the catastrophe of slipping velocity occurs with the accumulating of slipping displacement.

Key words discontinuous face rock sample catastrophe negative damping

(编辑 何学锋)