

for solving viscoelastic flow problems Part II integral constitutive models. *J Non-Newtonian Fluid Mech*, 1986, 22: 61~89

6 Caswell B, Viriyayuthakorn M. Finite element simulation of die swell for a Maxwell fluid. *J Non-Newtonian Fluid Mech*, 1983, 12: 13~29

## NUMERICAL SIMULATION OF DIE SWELL FOR INTEGRAL MAXWELL FLUID

HUANG Shuxin JIANG Tiqian  
(East China University of Science and Technology,

Shanghai 200237, China)

**Abstract** In this paper, numerical simulation of die swell for the integral Maxwell fluid is investigated employing the stress calculation method based on the conventional finite element used by Luo and the method of avoiding singularity used by Fan. The reasonable solution of higher Weissenberg number is obtained.

**Key words** viscoelastic fluid, integral Maxwell constitutive equation, die swell, numerical simulation

## 泥石流的启动分析<sup>1)</sup>

鲁晓兵

崔鹏

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (中国科学院成都山地所, 成都 610041)

**摘要** 分析了由于振动或冲刷等动载荷引起散体堆积物的液化或流态化而导致的泥石流。据此, 认为这是在小坡角 ( $10^\circ$  以内) 条件下泥石流形成的主要原因。

**关键词** 泥石流, 启动, 冲刷, 流态化

为了预测和防治的目的, 泥石流的启动一直是人们研究的重点<sup>[1,2]</sup>, 从这些研究中也得到了一些较好的泥石流启动判别准则, 如 Takahashi 根据土坡静态极限平衡原理得到的准则<sup>[1]</sup>。但是根据 Takahashi 的准则得到的临界启动坡角 ( $14'5 \sim 22'9$ ) 常大于许多实际泥石流沟的坡角。这表明他的结果还存在不足, 更深入的研究还需要进行。虽然其他人也提出了一些准则, 但是仍然在使用上存在一些局限性。基于上述观点, 在下面将讨论土体液化及流态化对泥石流启动的影响。

### 1 Tamotsu Takahashi 的理论

Tamotsu Takahashi<sup>[1]</sup> 考虑一个斜坡上的松散散体堆积物的坡角小于或约等于静摩擦角 (图 1), 因此堆积物不会发生大体积滑动或流动。但是, 如果有水流过堆积体时, 堆积体可能突然启动而形成泥石流。Tamotsu Takahashi 对这个问题进行了分析, 假设水的渗流平行于坡面且在土体中不产生超压 (超过静水

压力的部分), 也就是说, 泥石流的启动是由静力作用引起的, 动力作用的影响可以忽略。

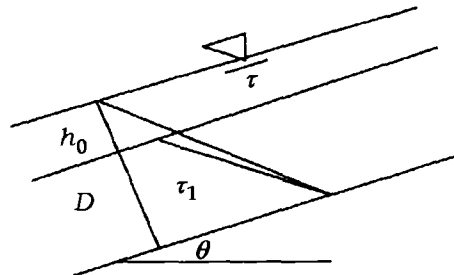


图 1 Tamotsu Takahashi 模型的示意

通过分析, Tamotsu Takahashi 得到泥石流临界启动条件如下

$$\tan\theta \geq \frac{c^* \cdot (\sigma - \rho)}{c^* \cdot (\sigma - \rho) + \rho \cdot \left(1 + \frac{1 + h_0}{d}\right)} \cdot \tan\phi \quad (1)$$

其中,  $\theta$  是临界启动角,  $\phi$  是堆积体内的摩擦角,  $\sigma, \rho$  分别为颗粒和水的容重,  $c^*$  是固相颗粒的体积百分含量,  $h_0$  是超出堆积体表面的水的深度,  $d$  是颗粒的平均粒径。

根据该公式及室内外实验数据, Tamotsu Takahashi 给出泥石流沟的临界启动坡角为  $14'5 \sim 22'9$ ,

1) 国家自然科学基金杰出青年基金项目 (40020153) 资助。

2001-01-12 收到第 1 稿, 2001-07-24 收到修改稿。

即只要泥石流沟的坡角大于该临界坡角, 泥石流就有可能产生.

但是, Tamotsu Takahashi 给出的临界坡角比许多实际泥石流沟的坡角大<sup>[3]</sup>, 本文的目的就是讨论在小坡角的沟道中形成泥石流的原因.

### 2 振动引起的泥石流

斜坡上的散体堆积物在振动作用下(如地震作用下), 如果堆积体是由松散的无黏性颗粒和水组成的饱和体时, 如果受到振动载荷作用而同时孔隙水难以排出, 常常引起超孔隙水压而导致堆积体抗剪强度的丧失, 甚至液化<sup>[2,4,5]</sup>(图2). 这时丧失了强度的堆积体就能够在很小的坡度下(几度)流动而形成泥石流. 当然, 液化区的范围与振动作用时间和强度有关, 下面以文[4]中的一个结果作示例, 当振动载荷施加于砂土地基上时, 饱和土体将逐渐发展到液化且液化区逐渐扩展(图3).

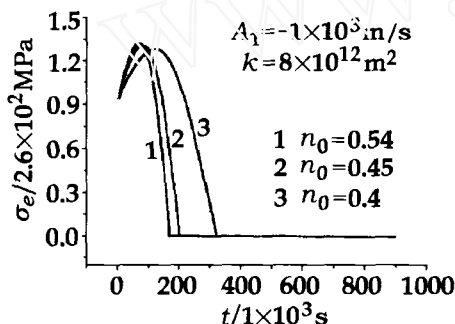


图2 有效应力随时间变化示意

( $\sigma_e$  为有效应力,  $t$  为时间,  $A_1$  为速度振幅,  $k$  为渗透率,  $n_0$  为孔隙率)

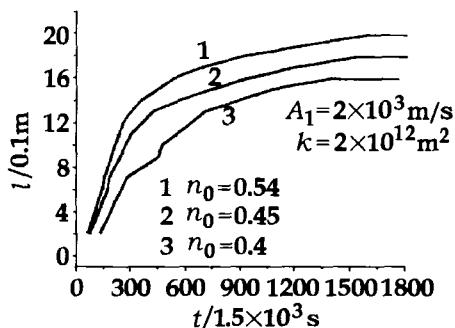


图3 液化区随时间扩展的示意

( $l$  为液化区厚度)

图2和图3的结果表明, 在振动载荷作用下, 骨架的有效应力将逐渐降低到等于零的液化状态, 并且液化区会逐渐扩展. 在液化状态下, 堆积体的内摩擦

角约等于零, 因此即使在坡角较小的情况下, 也很容易流动而形成泥石流.

### 3 冲刷引起的泥石流

现场观测和室内实验表明, 强烈的冲刷也是导致泥石流产生的原因之一. 王兆印<sup>[3]</sup>曾经作了一系列实验研究冲刷对泥石流形成的影响, 并以此来解释为什么泥石流能在小坡角的情况下启动. 他是用冲刷的动能来解释这个问题. 下面我们用体积积分的方法来分

析. 当水流通过堆积体表面时(在洪水情况下水一般是浑浊的), 表面将产生剪应力. 其大小可以由下面的方法求得. 根据流体力学理论, 可以得到如下的描述堆积体表面水流运动的方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} +$$

$$g \cdot \frac{\partial z_w}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

其中  $u, v, w$  分别为水流沿  $x, y, z$  轴的速度,  $z_w$  为水流表面的高程,  $x$  为轴平行于坡面,  $z$  为轴垂直于坡面.

将式(2)、式(3)沿垂向( $z$ 轴)积分, 我们可以得到

$$\frac{\partial(h \cdot \bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot \bar{v})}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial(h \cdot \bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot \bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot \bar{u} \cdot \bar{v})}{\partial y} +$$

$$g \cdot h \cdot \frac{\partial z_w}{\partial x} - \frac{\tau_0}{\rho} = 0 \tag{5}$$

其中,  $\bar{u} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h u dz$ ,  $\bar{v} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h v dz$ ,  $\tau$  为堆积体表面上的剪应力,  $h$  为水流深度.

将式(4)代入式(5), 就可以得到堆积体表面上的剪应力

$$\tau = -\rho \cdot \left[ \bar{u} \cdot \frac{\partial(h \cdot \bar{u})}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial(h \cdot \bar{u})}{\partial y} - g \cdot j \cdot h \right] - \rho \cdot \frac{\partial(h \cdot \bar{u})}{\partial t} \tag{6}$$

其中,  $j = -\partial z_w / \partial x$ .

明显地, 如果  $\partial \bar{u} / \partial t, \partial \bar{u} / \partial x, \partial \bar{u} / \partial y$  与  $gj$  相比可以忽略的话, 也就是说, 流动是稳定且均匀的, 就可以得到与 Tamotsu Takahashi 相同的结果, 这同时也说明水流的动力效应将使泥石流的启动角降低.

从另一方面, 通过分析可以知道, 堆积体表面的剪切应力可以引起堆积体内一定厚度  $y_0$  内产生超

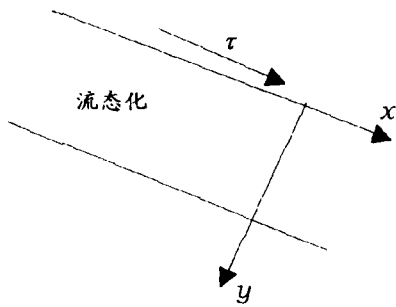


图 4 斜坡堆积体流态化示意 (据文献 [6])

孔压而使堆积体流态化 (图 4), 或者砂土内部发生液化即堆积体内部有一部分区域发生液化 [6], 在该厚度内没有正有效应力, 强度也已丧失, 这就会导致堆积体流动而形成泥石流, 即使在小的坡角条件下也可以形成泥石流. 厚度  $y_0$  随时间的变化可以表示如下

$$y_0 = \frac{F_0}{G_0} \frac{\tau}{(1-n)\gamma g_2} - \frac{k}{k_0} \frac{1}{(-1/(2+\delta))!} [(2+\delta)^2 C t]^{1/(2+\delta)} \quad (7)$$

其中,  $k_0, F_0, G_0$  是材料参数,  $\tau$  是堆积体表面的剪切应力,  $n$  是孔隙率,  $\gamma$  是固相的水下容重,  $g_2$  是重力沿垂直于堆积体表面方向的分量,  $k$  是随  $k_0$  和坐标位置变化的参数,  $\delta$  是随坐标位置变化的参数,  $C = k_0/G_0, t$  是时间.  $y_0$  随时间的变化如图 5.

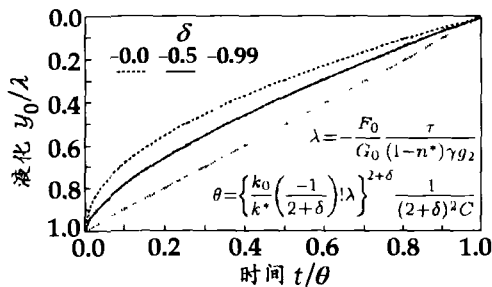


图 5 流态化厚度随时间的变化

#### 4 结 语

由以上分析表明, 由于振动、冲刷等原因引起的散体堆积物的液化和流态化在泥石流的形成中有重要作用. 为了准确预报泥石流的启动, 应综合考虑动静力作用对泥石流启动的影响. 本文对振动、冲刷等动力作用的影响是分别进行讨论的, 在实际情况下这些

因素是同时发生作用的. 本文仅进行了初步的分析, 在进一步的分析中应该考虑动静作用的定量分析及它们的耦合效应.

#### 参 考 文 献

- 1 Takahashi Tamotsu. The mechanical character of debris flow. *Journal of the Hydraulics Division, Proc ASCE*, 1978, 104(HY8): 1153~1169
- 2 Jeyapalan JK. Analysis of earthquake-induced flow slide movements. In: *Soil Dynamics & Earthquake Engineering Conference*. Southampton, 1982. 859~872
- 3 王兆印, 张新宇. 水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究. *地理学报*, 1989, 44(3): 291~301
- 4 Finn WD, Byrne PM, Martin GR. Seismic response and liquefaction of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1976, 102(GT8): 841
- 5 鲁晓兵. 垂向载荷作用下饱和砂上的液化分析. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999
- 6 Koenders MA, Sellmeijer JB. Liquefaction of unstable slopes. *Int J for Numer and Anal Methods in Geomech*, 1992, 16: 571~579

#### ON THE INITIATION OF DEBRIS FLOW

LU Xiaobing

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

CUI Peng

(Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract** The initiation of debris flow caused by liquefaction or fluidization under the dynamic loading such as vibration and crashing is analyzed. It is shown that the dynamic loading is the main cause for the debris flow on a slope with small angle (smaller than 10°).

**Key words** debris flow, initiation, crashing, fluidization