

滑带在高速剪切条件下的固液两相流问题

吴 剑^{1,2}, 罗先启², 程圣国²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 在滑坡快速下滑过程中, 滑带的剪切运动是某种形式的固液两相流。固相颗粒主要是碎石颗粒, 液相则是黏土颗粒和水的混合物。固相颗粒之间的液相, 无论是静止、流动还是两相流状态, 都会对固相颗粒的粒间作用力产生较大影响。在剪切速率达到一定程度后, 固相颗粒的随机碰撞产生的颗粒间作用力将成为颗粒间主要作用力, 在此作用力作用下, 固相颗粒运动符合 Navier-Stokes 方程所描述的流体运动。由于滑带特有的边界条件, 滑带材料在高速剪切条件下的流体运动, 可以用简化的 Navier-Stokes 方程, 即雷诺公式来表示。在一定边界条件下, 根据雷诺公式, 液相流体产生动压变化, 液相的动压变化引起固体颗粒之间的接触应力变化, 最终导致滑带整体的抗剪强度的变化。

关键词: 边坡工程; 固液两相流; 滑坡; 滑带; 动压

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3993 - 05

RESEARCH ON SOLID-LIQUID TWO-PHASE FLOW IN SLIDING BAND AT HIGH SPEED

WU Jian^{1, 2}, LUO Xianqi², CHENG Shengguo²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: When landslides slide down at high speed, the motion of the materials in sliding zone can be described as a kind of two-phase flow motion. The solid phase is made of grain, while the liquid phase is a mixture of clay and water. In the pore of the solid phase, the stress state of liquid phase will make great effect on the stress between the particles. When the shearing speed is high enough, the crash effect in solid phase becomes the main factor of stress between particles. In the state, the motion of solid phase abides by the Navier-Stokes equation. Because of the specific boundary condition of the sliding zone, the movement equation of material(Navier-Stokes equation) can be simplified to Reynolds equation. For some boundary condition, the liquid-phase pressure changes as the shearing speed changes according to the Reynolds equation, so the pressure will affect the contact stress between the solid-phase particles. As a result, the shearing strength will be changed.

Key words: slope engineering; solid-liquid two-phase flow; landslide; sliding band; hydrodynamic pressure

1 引 言

滑坡是一种常见的地质灾害, 滑坡研究中滑速

的计算和预测是一个非常重要的内容, 而在滑速的计算中, 滑带的力学特性对计算结果有较大影响, 因此研究滑带在剪切过程中的力学特性, 尤其是高速剪切条件下的抗剪强度, 对滑坡破坏过程的模拟

收稿日期: 2006 - 06 - 01; **修回日期:** 2006 - 08 - 25

基金项目: 2005 年度湖北省自然科学基金资助项目

作者简介: 吴 剑(1973 -), 男, 博士, 1999 年于武汉水利电力大学水工结构专业获硕士学位, 现任讲师, 主要从事防灾减灾方面的教学与研究
工作。E-mail: wujian73@163.com

意义很大。

目前在滑坡滑速模拟计算方法中，滑带摩擦力的计算普遍采用的是理想弹塑性模型(见图 1)，即当滑带所受剪切力低于滑带抗剪强度时，滑带处于弹性变形阶段，滑带的剪应力与剪应变相关，当滑带所受剪切力超过滑带抗剪强度时，滑带进入塑性变形阶段，此时滑带的剪切变形会持续增加，但剪切力保持不变^[1]。

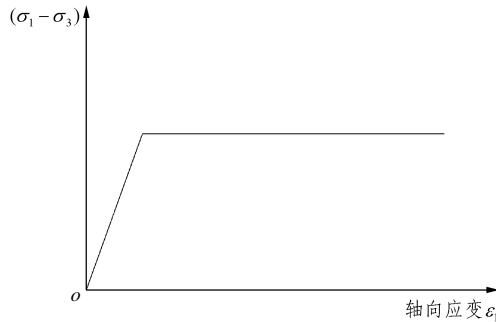


图 1 理想弹塑性应力 - 应变曲线

Fig.1 Perfect elasto-plastic stress-strain curve

实际上，对于滑带土这种有固结历史的结构性土体，在剪切进入到塑性阶段的过程中，其抗剪强度有一个从峰值强度到残余强度的过渡过程，峰值强度和残余强度的比值与滑坡滑速的有一定相关性，当比值越大，滑坡的滑速就可能越高^[2]。在实际的计算中，根据理想弹塑性模型计算得到的最大滑速往往偏小，其中的原因可能在于应力模型的区别^[3]。

为了解释滑带土抗剪强度峰残强降的力学机制，后文拟从固液两相流角度描述滑带土在高速剪切条件下运动特征，并通过固液应力耦合解释峰残强降的力学特性变化过程。

2 土的固相和液相

土是由土体颗粒、水和空气组成的多相体，如果土体处于饱和状态，没有空气的存在，此时土就是土体颗粒和水组成的两相体，现有的大部分土力学研究主要是围绕这种两相体展开的。水、土中的液相，不管是处于静止状态还是流动状态，都对土体的力学特性产生显著的影响。

2.1 固液相均为静态

在固液相均为静态条件下，土中的固体物质(固

相)被认为构成土体的固体骨架，水作为液相填充其间，有效应力公式可以表示这种状态下固液应力的耦合关系：

$$\sigma' = \sigma - p \tag{1}$$

式中： σ' ， σ 和 p 分别为土的有效应力、总应力和孔隙水压力。

而土体的抗剪强度 τ 只与土颗粒之间的有效应力有关，即 Coulomb 公式：

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \tag{2}$$

式中： c ， φ 分别为土的黏聚力和内摩擦角。

2.2 固相静止、液相流动

如果不考虑土的流变，土的固体颗粒保持静止，水以流态形式通过土体，这就是渗流问题。渗流问题中渗流的基本方程包括运动方程、连续性方程和流体的本构方程。实际流体单元的运动方程^[4]为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv'_x}{dt} &= f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 v'_x \\ \frac{dv'_y}{dt} &= f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v'_y \\ \frac{dv'_z}{dt} &= f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 v'_z \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

写成向量形式，即

$$\frac{d\mathbf{v}'}{dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}' \tag{4}$$

式(4)的左边为流体单元加速度，右边分别是表示质量力、流体压力和黏滞阻力的作用项。如果把渗流看作连续介质，可以引入孔隙比 n ，对式(4)做一个简单的变换：

$$\frac{1}{n} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{n} \mu \nabla^2 \mathbf{v}$$

在流体运动方程里，固液两相之间有两种形式的应力传递，或是应力耦合关系，分别是流体压力和黏滞阻力，流体压力对土体结构的作用见式(1)，它将降低土体颗粒之间的接触应力。流体沿固液界面面积分即得到渗透力，渗透力为土体内力，方向与流线一致。

3 固相颗粒的颗粒流

滑带土在滑动剪切过程中，不管是碎石颗粒还是水，都处于运动状态。固相颗粒的抗剪强度主要来自颗粒之间的摩擦和碰撞，而流体的剪切力与流

体流动的剪应变率有关, 由于两者的力学本构的差异, 在研究滑带土总体的抗剪强度变化时, 应该以两相流的运动形式描述滑带的运动特征。其中较大的碎石颗粒以颗粒流的形式运动, 较细的黏土颗粒与水混合成为具有一定黏度的黏性流体, 以黏性流体方式流动。

两相流系统可以采用宏观和微观两种方法来研究。相应的理论分别称作两相流宏观的连续介质理论和微观的运动理论。宏观的连续介质模型^[5]又可分为如下3类:

(1) 分流模型, 对于分层流和管道中环状流这些有着较固定分界面的多相流, 可与单相流一样把各相假定为连续介质。

(2) 两相体模型, 把两相流中的各相都分别假定为连续介质, 它们同时充满整个流场。各相流动参数在相交界面上发生间断, 通过相界面各相产生质量和热量传递。

(3) 扩散模型(或称单流体模型), 该模型假定相互作用着的两相构成了一种新的物质(称作混合物)且连续充满整个流场, 对混合物用一组混合流动参数描述, 而每相的参数与混合参数之间用扩散方程联系。

在研究渗流问题时, 所采用的宏观连续介质模型就是两相体模型, 对于在高速剪切条件下的滑带, 也采用两相体模型来进行描述。

3.1 碎石颗粒流

无黏性颗粒流随剪切速度的增大, 其颗粒间作用力呈现出3种不同的状态。在剪切速度较低时, 颗粒间主要的剪切力是 Coulomb 摩擦力, Coulomb 摩擦力与颗粒的剪切速率无关, 是颗粒间的持续接触力。当颗粒群运动的速度非常大时, 散体颗粒之间出现剪胀, 颗粒浓度降低, 颗粒间的碰撞作用占主导地位, 颗粒间的剪切力主要由碰撞应力引起。当颗粒群体积的膨胀导致颗粒浓度很低, 颗粒间较少发生碰撞, 颗粒间的动量传递及能量传递主要是由于颗粒的位置交换伴随着动量交换, 由此产生颗粒流的应力, 称作弥散应力^[6]。

假设颗粒基本上形状一致, 接近球形, 或者就是以随机变量 r 为半径的圆球。此外还假设颗粒的密度、热传导系数等都为常数。定义颗粒的函数 f :

$$f = f(x, V, r, t) \tag{5}$$

式中: x 为空间位置, V 为颗粒速度, r 为半径, t

为时间。其意义为: 空间 x 处体积元 dx 内, 落在流速 $[V, V+dV]$ 和半径 $[r, r+dr]$ 范围内的颗粒数为

$$dn = f(x, V, r, t) dx dV dr \tag{6}$$

其中,

$$dV = dV_1 dV_2 dV_3$$

$$dx = dx_1 dx_2 dx_3$$

颗粒的分布函数由下面 Boltzmann 方程决定(略去了热导因子):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Vf) + \frac{\partial}{\partial V}(F, f) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{Mf}{3m}\right) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_c \tag{7}$$

式中: F 为单颗粒受到的单位质量的外力, 通常为重力及沿坡面的摩擦阻力; m 为单颗粒的质量, 为粒径的函数; M 为单颗粒的质量传递率。式(7)等号右端为碰撞积分项, 为由于颗粒碰撞引起的分布函数的变化率。

式(7)表明, 单位体积内颗粒数的平衡, 即分布函数 f 随时间总的碰撞变化率等于单位体积颗粒数随所有变化量的变化。

那么以 k 相颗粒速度的零阶和一阶矩乘以颗粒的 Boltzmann 方程两边, 然后对整个速度空间积分可以得出 k 相颗粒的质量和动量守恒方程如下:

$$\left. \begin{aligned} d \frac{dm}{dt} &= -\rho \nabla u \\ \rho \frac{du}{dt} &= F - \nabla P \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式中: ρ 为颗粒流的密度; u 为颗粒流的速度; F 为流体单元的质量力, 如果只有重力作用, F 等于重力; P 为颗粒流的应力张量。

可以看到基于颗粒的 Boltzmann 方程所推导的单相的颗粒流质量和动量守恒方程与流体力学中的连续性方程和 Navier-Stocks 动量方程具有相同的形式, 说明当颗粒运动过程中颗粒间碰撞作用力超过摩擦作用力, 成为颗粒间主要的能量交换方式时, 颗粒群的运动可以描述为流体运动^[7~9]。

3.2 两相流中的黏性流体

在高速剪切情况下, 两相流中的液相的应力变化较固相更为显著, 因此研究滑带土在高速剪切条件下的应力变化, 主要的研究对象就是滑带土中的液相。

建立滑带中液相的运动方程, 可以先建立实际流体单元的运动方程, 在考虑液相在滑带土中的分

布密度，因此形式上运动方程与渗流问题中的渗流运动方程(式(3))一致。因为滑带中的液相不仅包含水，还包含一部分黏土颗粒，所以 n 不是孔隙比的概念，而是分布密度的概念。

4 流固边界耦合——动压效应

前段说明的是滑带土在高速剪切条件下液化过程，当滑带达到液化条件，以流体形式运动，滑带的滑阻特性则由滑带流体和其上下岩石边界耦合作用决定，这种效应在摩擦学中称为动压润滑效应。流体动压现象是机械润滑中普遍存在的润滑现象，其原理在于两个滑动表面在相对运动时产生明显高于静止压力的流动压力，流动压力的形成是滑动面之间的流体压力足以支撑法向压力，从而将两个表面分隔开，形成流体动压润滑。以下是摩擦学中对动压润滑效应的简化证明(见图 2)，用以说明滑带在高速剪切过程中超高孔隙压力的形成机制^[10]。

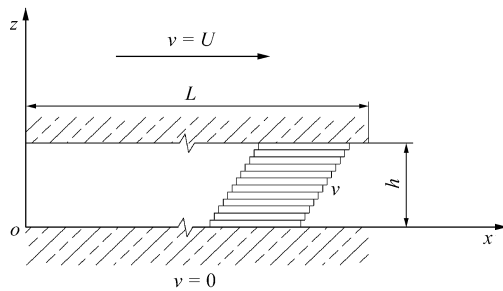


图 2 滑带结构的简化

Fig.2 Simplification of sliding band

Navier-Stocks 方程在描述两个平板之间的库特剪切流时，可以简化为雷诺方程，根据滑带的结构特点和运动方式，简化后的雷诺方程同样也适用于滑带运动方式的定义：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U \rho h) + 2 \rho (w_h - w_0) \right] \quad (9)$$

式中： U 为滑带上部边界的运动速度， h 为滑带厚度， η 为液相的黏滞系数， w_0 为液相从 $z = 0$ 平面流入的速度， w_h 为液相从 $z = h$ 平面流出的速度。

如果不考虑流体边界流体的流入或流出，即将雷诺方程简化成一维常微分方程：

$$\frac{d}{dx} \left(h^3 \frac{dp}{dx} \right) = 6U\eta \frac{dh}{dx} \quad (10)$$

滑带的厚度 h 一般是变化的，如果假定 $h = h(x)$ ，对这一方程积分两次后，其通解可以写成

$$p = \int \frac{6U\eta}{h(x)^2} dx + C_1 \int \frac{dx}{h(x)^3} + C_2 \quad (11)$$

式中： C_1 和 C_2 为积分常数，可以根据边界条件确定。以摩擦润滑研究中最普遍的楔形润滑结构为例，假设如图 3 所示的楔形结构的摩擦运动副以相对速度 U 运动，结构长度为 B ，上下摩擦(运动)表面之间充满黏性系数为 η 的黏性流体，结构的入口和出口液相压力为 p_0 ， $h(x) = h_0 \left[1 + \frac{x(h_1 - h_0)}{h_0 B} \right]$ 。

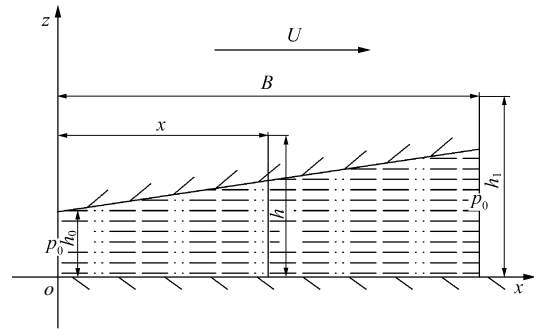


图 3 楔形结构的简化

Fig.3 Simplification of wedge structure

根据以上条件可以推导出 x 处的液相压力为

$$p = 6U\eta BK(h) + p_0 \quad (12)$$

式中： $K(h)$ 为与楔形结构尺寸有关的系数，符号为正。公式的等号左端前一部分就是液相中与剪切速度有关的流动压力。

以上结果可以证实在滑带高速剪切条件下，滑带如果以流态化运动，其中的液相流体在滑带上下粗糙表面的影响下，可以产生如上述润滑结构中存在的压缩动压，动压的升高会导致固相颗粒之间的作用力减弱，从而影响滑带整体的抗剪强度。

5 结 语

将处于高速剪切条件下滑带看作固液两相流，并根据宏观两相体模型，将两相流中的各相分别假设为连续介质，分别描述两相的运动状态和应力状

态, 其中固相颗粒在滑带剪切过程中随着剪切速度的变化可以以流态方式运动, 而液相的动力特征符合雷诺方程。受滑带厚度变化影响, 在剪切过程中, 滑带中的液相会产生超孔隙压力, 降低颗粒间的接触应力, 对滑带的抗剪强度产生影响。

参考文献(References):

- [1] 龚晓南. 土塑性力学(第二版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.(Gong Xiaonan. Plastic Mechanics of Soil(Second Edition)[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 程谦恭, 胡厚田, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡床床弹冲与峰残强降复合启程加速动力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173 - 176.(Cheng Qiangong, Hu Houtian, Hu Guangtao, et al. A study of complex accelerated dynamics mechanics of high speed landslide by elastic rocky impulse and peak residual strength drop[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 173 - 176.(in Chinese))
- [3] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.(Pan Jiazheng. Seepage Computation Analysis and Control[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980.(in Chinese))
- [4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 2003.(Mao Changxi. Seepage Computation Analysis and Control[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2003.(in Chinese))
- [5] 刘涌江. 大型高速岩质滑坡流体化理论研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安交通大学, 2002.(Liu Yongjiang. Study on fluidify theory of large high speed rockslide[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.(in Chinese))
- [6] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991.(Ni Jinren, Wang Guangqian, Zhang Hongwu. Basic Theory of Solid-liquid Two-phase Flow and New Application[M]. Beijing: Science Press, 1991.(in Chinese))
- [7] 王光谦, 熊刚, 方红卫. 颗粒流动的一般本构关系[J]. 中国科学(E辑), 1998, 28(3): 282 - 288.(Wang Guangqian, Xiong Gang, Fang Hongwei. General constitutive relationship on granular flow[J]. Science in China(Series E), 1998, 28(3): 282 - 288.(in Chinese))
- [8] 陈洪凯, 唐红梅, 陈野鹰. 泥石流固液分相流速计算方法研究[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(3): 357 - 363.(Chen Hongkai, Tang Hongmei, Chen Yeying. Research on method to calculate velocities of solid phase and liquid phase in debris flow[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(3): 357 - 363.(in Chinese))
- [9] 倪晋仁, 王光谦. 泥石流的结构两相流模型: I. 理论[J]. 地理学报, 1998, 53(1): 66 - 75.(Ni Jinren, Wang Guangqian. Conceptual two-phase flow model of debris flow: I. theory[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(1): 66 - 75.(in Chinese))
- [10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.(Wen Shizhu, Huang Ping. Tribology Mechanism[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.(in Chinese))