

滑带在高速剪切条件下的固液两相流问题

吴 剑 罗先启 程圣国

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,液相则是粘土颗粒和水的混合物。在剪切运动中,固相颗粒与液相流体共同分担剪切力,固相颗粒之间的作用力主要是库伦摩擦力。根据雷诺公式,液相流体在滑带上下约束下会产生动压变化,液相的动压变化导致固体颗粒之间的接触应力降低,进而降低了固相的抗剪强度,最终滑带整体的抗剪强度会随剪切速度的增加而下降。

关键词:固液两相流; 滑坡; 滑带; 动压

Research on the Solid-liquid Two Phase Flow in the Sliding Zone Shearing at High Speed

Wu Jian Luo Xianqi Cheng Shengguo

Abstract During landslides sliding down at high speed, shearing motion of the sliding zone is a kind of two-phase solid-liquid flow. The solid phase grain is made of debris, while the liquid phase is a mixture of viscous clay and water. In the shearing motion the solid-phase grain and liquid-phase fluid share the shear force and the acting force among the solid phase grains is mainly of Coulomb frictional force. According to the Renault formula, dynamic pressure change will take place in the liquid-phase fluid restrained by the sliding zone upwards and downwards, which leads to the decrease in contact stress among the solid grains and in turn the decrease in shear strength of the solid phase. As a result, the shear strength of the whole sliding zone will decrease as the shearing speed increases.

Key words solid-liquid two phase flow; landslide; shearing zone; hydrodynamic pressure

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意义很大。目前在滑坡

作者简介:吴 剑(1973 -),男,三峡大学土木水电学院讲师,博士;邮编:443002。

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,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]。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的运动特征,并通过固液应力耦合解释峰残强降的力学特性变化过程。

1 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。

1.1 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 和 p 分别为土的有效应力、总应力和孔隙水压。而土体的抗剪强度 τ 只与土颗粒之间的有效应力有关,即库伦公式

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

式中、 c 、 ϕ 分别为土的粘聚力和土的内摩擦角。

1.2 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如下^[4]:

$$\frac{dv_x}{dt} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 v_x; \quad \frac{dv_y}{dt} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v_y; \quad \frac{dv_z}{dt} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 v_z$$

写成向量形式,即

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \tag{3}$$

方程的左边为流体单元加速度,右边分别是表示质量力、流体压力和粘滞阻力的作用项。如果把渗流看作连续介质,可以引入孔隙比 n ,对式(3)做一个简单的变换即可,得 $\frac{1}{n} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{n} \nabla p + \frac{1}{n} \mu \nabla^2 \mathbf{v}$ 。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应力耦合关系,分别是流体压力和粘滞阻力,流体压力对土体结构的作用如式(1),它将降低土体颗粒之间的接触应力;流体沿固液界面积分即得到渗透力,渗透力为土体内力,方向与流线一致。

2 滑带土的固液两相流

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,较细的粘土颗粒与水混合成为具有一定粘度的粘性流体,以粘性流体方式流动。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又可分为3类^[5]:(1)分流模型,对于分层流和管道中环状流这些有着较固定界面的多相流,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。

2.1 滑带中的固相颗粒

固相颗粒流的应力由3部分组成^[6]:

$$= \text{摩擦} + \text{弥散} + \text{碰撞} \quad (4)$$

各种作用力随不同的流动条件而相互消长。第1项为库伦摩擦力,与颗粒的剪切速率无关,为颗粒间的持续接触力;在很低的剪切速率和近乎密实的高浓度下占主导地位,在高切变速率和低浓度下,此项应力变弱。第2项所表示的是弥散应力,在浓度很低时占优势。而当颗粒浓度较高时,此项应力变弱。第3项为颗粒的碰撞作用力,碰撞作用力与弥散应力的变化规律相反,在颗粒浓度较高时占优势,颗粒浓度低时变弱。滑带在滑坡下滑过程中是否会剪切膨胀并不清楚,但是必定受到较大的垂直压力而非常密实,因此在滑坡下滑过程中,可以假定滑带的剪应力仍然以库伦摩擦力为主。

2.2 滑带中的粘性流体

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,再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(3)一致。因为滑带中的液相不仅包含水,还包含一部分粘土颗粒,所以公式中的 n 不是孔隙比的概念,而是分布密度的概念。根据滑带结构的特殊边界条件,可以推导出雷诺方程。

2.3 雷诺方程

根据以下假设条件,结合连续性方程和流体应力本构关系可以推导出雷诺方程即式(5)。

(1)滑带液相的上下边界可以认为是总体平行的空间刚体平面;(2)液相在刚体界面上无滑动;(3)在沿滑带厚度方向不计液相内部压力的变化;(4)忽略液相的体积力;(5)液相流动为层流。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{h^3}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U h) + 2 (w_h - w_0) \right] \quad (5)$$

式中, U 为滑带上部边界的运动速度; h 为滑带厚度; ρ 为流体密度; η 为液相的粘滞系数; 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

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

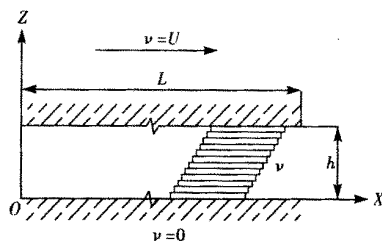


图1 滑带结构的简化

3 动压效应

滑带的厚度 h 一般是变化的, 如果假定 $h = h(x)$, 对式(6)积分两次后, 其通解可写成^[7]

$$p = \frac{6U}{(h(x))^2} dx + C_1 \frac{1}{(h(x))^3} dx + C_2 \quad (7)$$

式中, C_1 和 C_2 是积分常数, 可以根据边界条件确定。根据式(7), 滑坡在滑动过程中存在一个动压力, 这个压力与滑坡的滑动速度以及滑带液相粘度有关, 即式(7)右边第一项。由于滑带厚度的起伏变化, 这个动压力往往超过原静态压力, 也就是超孔隙压力。随着超孔隙压力的升高, 滑带中的固相颗粒之间的接触应力减小, 滑带的抗剪强度不再完全是固相颗粒之间的摩擦力, 而是由固相和液相共同承担。这样固液两相流的抗剪强度会有明显的降低, 且在一定的速度区间内会随速度的增高而减小, 这与土的残余强度试验结果是一致的。

4 结 语

把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, 把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的应力形式基本不变, 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, 使滑带的抗剪强度完全由固相颗粒间摩擦力承担过渡到固相和液相共同承担。

参 考 文 献:

- [1] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [2] 程谦恭, 胡厚田, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡临床弹冲与峰残强降复合启程加速动力学机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 173-176.
- [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.
- [4] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [5] 刘涌江. 大型高速岩质滑坡流体化理论研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [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.
- [7] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[责任编辑 王康平]