

大型高速岩质滑坡启程活动阶段孔隙流体压力效应

邢爱国, 胡厚田, 姚令侃

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 大型高速岩质滑坡在启程活动阶段由于高速摩擦产生高温, 使滑带水突然汽化, 产生巨大的水汽压力, 并且可能产生水汽垫层。这气垫支持着滑体并产生润滑作用, 使作用在滑动面上的有效法向压力显著降低, 因抗滑力随法向压力的降低而减少, 滑体可获得一巨大速度。以云南头寨大型高速岩质滑坡为原型通过计算证实了孔隙水汽化的可能性, 并进一步计算了孔隙水汽化压力的大小。

关键词: 高速滑坡; 启程阶段; 汽化压力; 气垫层

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)03-0017-03

中图分类号: P642.22

Pore Liquid Pressure of Large High-speed Rockslide in Initial Stage

XING Ai-guo, HU Hou-tian, YAO Ling-kan

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, PRC)

Abstract: Large high-speed landslide may produce a very high increase in temperature, and convert the water in sliding zone into vapour, creating a cushion which sustains the slide mass. As a result, effective normal pressure reduces significantly under the sliding surface, and the sliding mass acquired the high velocity. It was proved by calculation on Touzhai large high-speed rockslide in Yun'nan province that the water in sliding zone can be vaporized, and the value of steam pressure is calculated.

Keywords: high-speed landslide; initial stage; steam pressure; air cushion

1 前言

意大利瓦依昂特大型灾难性滑坡发生后, 在世界范围内高速滑坡成为滑坡研究的热点之一, 陆续出现许多有关大型高速岩质滑坡机理的专门性研究成果。瓦依昂滑坡的发生向滑坡研究者提出了 2 个问题: 滑坡起初如何高速启动以及何以运动如此之快?

高速滑坡之所以能够在极短时间内运动到较远的地方, 这不仅要依赖于滑坡体中蕴藏着巨大的变形能, 还必须依赖滑道上极低的摩擦阻力, 这是所有研究者都公认的。为了研究方便起见, 据大型高速岩质滑坡活动的时间和空间, 可划分为启程、近程、远程 3 个相互连续的活动阶段。关于大型高速岩质滑坡启程后的高速滑动机理, P. Habib 等人提出的“孔隙水压力学说”认为, 大型高速岩质滑坡沿滑动面高速滑动时, 由于摩擦生热孔隙消耗在滑动面上的由摩擦阻力所作的功将产生热量。如果剪切速率足够大, 释放的热量可使孔隙水压力升高, 甚至将水变成水蒸气, 产生水汽垫层。这汽垫支撑着滑坡体并产生润滑作用。Hutchinson, J. N 等人通过对瓦依昂滑坡滑动带

土进行高速环剪试验, 结果表明当剪切速率 > 100 mm/min 时, 滑动带土的抗剪强度可降低到慢剪时残余强度的 60% 以下, 以此来解释大型高速岩质滑坡启程高速的机理。尽管这些学者关于孔隙流体压力效应的研究取得了很多的成果, 但多数结果仍属结果分析、理论假设或现象推理等, 而试验研究及定量研究成果较少。至今为大家公认的理论 and 成果不多。

大型高速岩质滑坡在启程活动阶段中, 由于锁固段突然被剪断, 高度集中的剪应力突然释放, 在饱水的滑动带孔隙水压力值有一个突然增大的现象, 同时, 由于强烈地高速摩擦, 产生高温, 使滑动带水突然汽化, 产生巨大的水汽压力。孔隙水压力与汽化的水汽压力耦合, 以及水汽压力与剪应力耦合, 使滑动带抗剪强度骤然降低, 这些流体动力学现象是产生启程剧滑高速的重要原因。本文将着重对大型高速岩质滑坡启程活动阶段的孔隙水汽化压力效应进行研究。

2 孔隙水汽化压力效应研究

2.1 滑坡高速滑动过程中滑动面温度的变化规律
在启程活动阶段当滑体在滑床上高速滑动时, 由

收稿日期: 2000-10-08

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(49872087)

作者简介: 邢爱国(1973-), 男(汉族), 陕西礼泉人, 1995 年毕业于西安科技学院获硕士学位, 2001 年毕业于西南交通大学获博士学位。主要从事环境岩土工程防灾减灾工程及防护工程等方面的科研工作。电话(028)7600653

于强烈地高速摩擦,大部分阻力功是以热能的形式释放,使得滑体处在一个较高的温度场中;而且由于滑体物质的热传导性能较差,导致了滑面附近的局部高温,使滑带水突然汽化,从而改变滑体滑动的条件。因此,研究滑坡在滑动过程中滑面温度场的变化规律,有助于了解水汽垫层的形成条件,进一步估算水汽压力的大小。

在滑体上垂直滑面取单位面积的柱体,并做如下假设:

(1) 滑坡体物质是各向同性的连续介质,其热传导系数 k 、热扩散率 α 、比热 c 和密度 ρ 均为已知,且与温度无关;

(2) 滑体高速摩擦产生的热能,仅考虑其沿垂直滑面方向的热传导,而忽略平行滑面方向的热传递。

(3) 滑体内部流体的对流传热忽略不计;

(4) 滑坡在滑动前,滑体内部温度场为均匀场;

(5) 摩擦阻力所做的功全部转化为热能。

设滑面的摩擦系数为 μ ,滑体的密度为 ρ ,滑体的热传导系数为 k ,滑体的厚度为 H ,法向压力为 σ_n ,孔隙水压力为 $u(x, t)$,滑面与水平面的夹角 i 。

总法向压力 $\sigma_n = \rho \cdot g \cdot H \cdot \cos i$

有效法向压力 $\sigma_{ne} = \sigma_n - f \cdot u(x, t)$

摩擦阻力 $\tau = \mu [\sigma_n - f \cdot u(x, t)]$

其中 $f = 1 - \frac{\beta_g}{\beta_r}$

β_g 为滑带土固体颗粒的压缩率, β_r 为滑带土体的压缩率。在滑带饱水的情况下 $\beta_r > \beta_g$, 所以 $f \cong 1$ 。

摩擦阻力 τ 在单位时间内所做的功

$$W = \tau \cdot v = \mu \cdot [\sigma_n - u(x, t)] \cdot v$$

假设摩擦阻力所做的功全部转化为热能,则滑坡在高速滑动过程中单位时间内产生的热量

$$Q = \mu \cdot [\sigma_n - u(x, t)] \cdot v$$

事实上,高速滑坡在启程活动阶段持续时间很短,例如云南头寨滑坡仅 16 s 左右,加之玄武岩的渗透系数极低。由于强烈地高速摩擦,仅在滑面附近很窄的区域内产生高温,在滑带饱水的情况下,滑面附近孔隙水突然汽化,产生巨大的水汽压力。为了方便起见,我们把该区域称为“汽化带”。

设滑面附近“汽化带”的厚度为 h ,滑带土的比热为 C_r ,密度为 ρ_r ,孔隙水的比热为 C_w ,密度为 ρ_w , n 为滑带土的孔隙度,汽化带温度为 θ (在不考虑孔隙水汽化的情况下“汽化带”所能达到的温度),则有:

$$h \cdot [\rho_r C_r (1 - n) + \rho_w \cdot C_w \cdot n] \cdot \frac{d\theta}{dt} = Q$$

所以单位时间单位面积上所传递的热量,即热流

密度 q 在数值上满足下式:

$$q = \frac{d\theta}{dt} = \frac{Q}{h \cdot [\rho_r \cdot C_r (1 - n) + \rho_w \cdot C_w \cdot n]}$$

通过以上各式可得热流密度:

$$q = \frac{u \cdot [\rho \cdot g \cdot H \cdot \cos i - u(x, t)] \cdot v}{h \cdot [\rho_r \cdot C_r \cdot (1 - n) + \rho_w \cdot C_w \cdot n]} \quad (1)$$

由于假设热传导只沿垂直于滑面的方向传递,因此该问题可简化为一维非稳态热传导问题。偏微分方程为:

$$\alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

初始条件

$$I. C \quad t = 0, \quad \theta = \theta_0$$

边界条件

$$B. C \quad x = 0, \quad \theta = \theta_0$$

$$x = H, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{q_0}{k}$$

为了简化起见,假定热量是等量分配在滑体和滑坡床上,故有: $q_0 = \frac{1}{2} q$

采用传统的分离变量法求解该问题,其解为:

$$\Delta\theta = \frac{q_0}{k} \cdot \left[x - \frac{8H}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot \alpha}{4H^2} \cdot t\right) \right]$$

令 $x = H$, 则可得滑面上温度变化的方程:

$$\Delta\theta = \frac{q_0 \cdot H}{k} \cdot \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot \alpha}{4H^2} \cdot t\right) \right] \quad (2)$$

2.2 孔隙水汽化压力的计算

本文以云南头寨大型高速岩质滑坡为例,计算滑坡在高速滑动过程中产生的汽化压力的大小。首先需要考虑滑坡在高速滑动过程中孔隙水能否汽化,也就是 $\Delta\theta$ 能否超过所需值 $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, 则 $\Delta\theta = 80^\circ\text{C}$ 。温度的变化情况与滑动面上产生的热量有关,而热量的大小与滑动面摩擦系数的高低密切相关。所以有必要了解滑动面上摩擦系数的变化规律。作者在西南交通大学 MM-1000 摩擦材料试验机上对饱水的玄武岩试件进行了高速摩擦试验,得到了 $v = 4.0$ m/s 时摩擦系数与压力的关系式:

$$\lg \mu = 0.35571 - 0.50104 \lg \sigma_n \quad (3)$$

相关系数 $R = -0.96135$ 。

根据滑坡的实际资料在考虑孔隙水压力的情况下,求出 $\sigma_{ne} = 6 \text{ kg/cm}^3$, 将其代入(3)式得到 $\mu = 0.3$ 。同时取 $\rho = 2.81 \text{ g/cm}^3$, $i = 45^\circ$, $v = 4 \text{ m/s}$, $n = 0.4$, $\rho_r = 1.9 \text{ g/cm}^3$, $C_r = 0.84 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, $h = 0.5 \text{ cm}$, $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$, $C_w = 4.2 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, $k = 1.3 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$, 代入式(1), (2)得到 $\Delta\theta = 155^\circ\text{C}$ 。

通过计算我们证实了大型高速岩质滑坡在高速

摩擦过程中滑带孔隙水汽化的可能性。上述计算是在未考虑孔隙水汽化情况下滑面所能达到的最高温度,下面我们着重考虑在滑动过程中因高速摩擦所产生的总热量减去“汽化带”土颗粒和孔隙水升温至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所消耗的热量后,其剩余的热量可使多少孔隙水汽化。

对于单位面积的滑面:

$$Q = (C_r m_r + C_w m_w) \Delta T + C_q m_w \quad (4)$$

式中:汽化热 $C_q = 2.66 \times 10^6 \text{ J/kg}$; m_w ——可能汽化的孔隙水的质量,其它符号意义同前。

求解式(4)得: $m_v = 0.153 \text{ kg}$ 。

单位面积“汽化带”孔隙水占有的体积:

$$V'_w = \frac{m'_w}{m_w} \cdot h \cdot n \quad (5)$$

假定此时的水蒸汽为理想气体,则有:

$$u_v V_v = n' R T \quad (6)$$

联立以上两式求解得: $u_v = 4.6 \times 10^6 \text{ Pa}$

事实上,大型高速岩质滑坡在滑动过程中滑体并非与滑床完全接触,同时由于滑体玄武岩风化严重、节理裂隙发育,因此滑体不是完全封闭的体系,孔隙水汽化压力一般不太稳定,随着水蒸气的向外逸出而逐渐消散。取孔隙水汽化压力的消散系数 $\eta = 0.1$,则得孔隙水汽化压力为: $u_v = 4.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(上接第16页)

(3) 窑址选择与施工质量是水窑建设成败的关键,窑址应选择在深厚坚硬的土层内,以红胶土最好,硬黄土次之,应避免质地疏松的新黄土和沟边、陷穴、砂砾层等不良土层。

[参 考 文 献]

- [1] 黄河水利委员会水利科学研究所. 黄河流域旱井调查研究[M]. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [2] 武汉水利电力学院. 土力学及岩石力学[M]. 北京: 水利出版社, 1979.

3 结论与建议

大型高速岩质滑坡在启程活动阶段由于高速摩擦导致滑动面附近的高温,通过计算得 $\Delta\theta = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而证实孔隙水汽化的可能性。同时通过计算得出孔隙水汽化压力 $u_v = 4.6 \times 10^5 \text{ Pa}$,可以看出孔隙水汽化压力是非常大的,并且可能产生水汽垫层。这气垫支持着滑体并产生润滑作用,使作用在滑动面上的有效法向压力显著降低,因抗滑力随法向压力的降低而减少,滑体可获得一巨大速度。

[参 考 文 献]

- [1] Voight B, Faust C. Frictional heat and strength loss in some rapid landslides[J]. Geotechnique, 1982, 32: 43—54.
- [2] Habib P. Production of gaseous pore pressure during rock-slides[J]. Rock Mech, 1975, 17: 193—197.
- [3] Yin Kunlong. Frictional heat landslide process. 6th International IAEG Congress[C]. 1990. 1769—1773.
- [4] 胡厚田, 杨明. 头寨大型高速远程滑坡流体动力学机制的分析研究[R]. 第六届全国工程地质大会, 南宁, 2000.
- [5] Iverson R M, Lahusen R G. Dynamic pore—pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials[J], Science 1989, 246: 796—799.

- [3] 杨峡, 刘亚非, 张春贤. 旱地水窑的设计与施工技术[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(2): 89—93.
- [4] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [5] 水利部西北水利科学研究所. 西北黄土的性质[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1959.
- [6] 侯继尧, 任致远, 周培南, 等. 窑洞民居[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [7] 张祖新, 龚时宏, 王晓玲, 等. 雨水集蓄工程技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.