

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

高速黄土滑坡的一种机理 ——饱和黄土蠕动液化

王家鼎

(甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 兰州)



本文提出了高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化。文中列举了甘肃地区饱和黄土蠕动液化造成高速滑坡的实例, 并从饱和黄土受力前后的应力条件及土体结构内部强度的变化分析了饱和黄土液化的机理。通过现场及室内试验得出剪切强度、剪切速度、饱和度及其它影响因素对液化程度的重要影响。提出了饱和黄土蠕、滑动液化导致高速滑坡的过程。最后, 还讨论了高速滑坡及泥流的速度问题。

关键词 高速黄土滑坡 饱和黄土蠕动液化 泥流

1 前言

有关高速滑坡的机制问题, 国内外学者都从不同的角度提出了自己的观点。如A. W. Skempton^[1]在研究1963年10月意大利Vajont地区峡谷滑坡时, 把岩体的残余强度显著降低认为是高速滑坡的机理。S. V. Romero等^[2]认为滑动面上的孔隙水压力起着重要作用。Erismann及黄润秋等^[3]也从“滚动摩擦”的角度对高速滑坡作了分析。陶振宇从滑动面孔隙水压的形成对高速滑坡作了解释。张佳川等^[4]从能量的观点分析了高速滑坡的运动状态。笔者^[5]曾在1991年利用变分原理研究了高速重力滑坡和地震滑坡的滑动轨迹和滑动速度。

笔者认为: 高速滑坡是众多因素影响的一种综合效应, 不同的地区和不同的条件会产生不同的高速滑坡, 有不同的形成机制。很多学者都认为高速滑坡是孔隙水压力影响的结果, 但它是如何产生和影响的, 尚未分析透彻。本文通过考察大量的高速黄土滑坡和室内土力学试验分析提出一种高速黄土滑坡的机制——黄土蠕动液化。

2 饱和黄土蠕动液化造成高速滑坡的实例

作为滑坡滑动带的饱和松散的马兰黄土或砂黄土(或称黄土状粉砂土)在重力滑坡体蠕动的作用下会产生较为缓慢的状态改变和强度丧失, 其结果会产生孔隙水压力, 降低土的抗剪强度, 使滑坡体滑动发展, 滑动发展的结果进一步使饱和黄土的液化程度提高, 以致达到完全液化便产生高速滑坡。滑坡体抛出的物质有固体成份, 也有液化产物(流塑状), 而残留于滑床的液化产物在高速滑坡体的带动下会形成泥流。这种现象在黄土地区是十分普遍的。如1989年3月15日

注: 本文为甘肃省自然科学基金资助项目(编号: ZR-90-01)。
本文1992年5月收到, 6月改回, 张力编辑。

发生在甘肃省永靖县盐锅峡镇焦家崖头的高速滑坡就是一个由蠕动变形引起液化, 液化又加剧滑动的典型实例。该滑坡位于 4 级阶地前缘, 滑坡体基本上由马兰黄土及黄土状粉砂土组成。滑面一部分是黄土状粉砂土与红色粘土层的接触带 (图 1)。由于马兰黄土疏松, 颗粒粗, 具大孔隙和强湿陷性, 阶地台面上大面积的灌溉

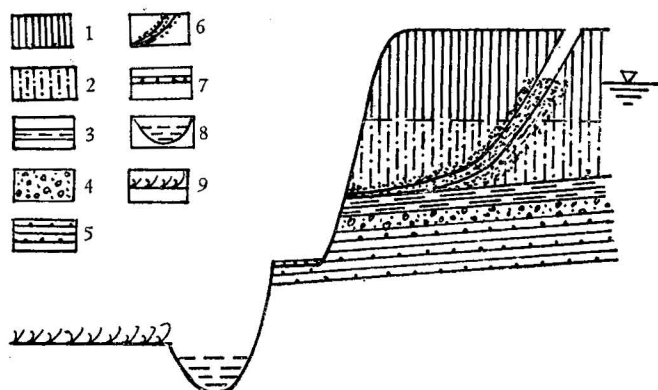


图 1 甘肃省永靖县焦家崖头滑坡剖面示意图

Fig. 1 The sketch map of profile of Jiaojiaaitou landslide in Yongjing county Gansu Province

1—马兰黄土; 2—黄土状粉砂土; 3—红色粘土; 4—砂卵石; 5—白垩系砂、泥岩互层; 6—滑面及液化带; 7—公路; 8—黄河; 9—农田
1—Malan loess; 2—loessial silt soil; 3—ferrallic loess; 4—gravel filllet; 5—sand and mud rocks interbedding in Cretaceous system; 6—slip plane and soil liquefaction belt; 7—highway; 8—Yellow River; 9—farmland

和强湿陷性, 阶地台面上大面积的灌溉 (灌溉大渠从台面边缘通过), 水沿土中孔隙和湿陷裂缝渗入地下。又由于红色粘土层具有良好的隔水性能, 并且岩层倾向与坡向一致, 倾角 5° — 15° 。水的长期滞留使黄土层抗剪强度降低, 粘土层泥化, c 、 φ 值降低, 滑体在重力作用下蠕动变形。这样外力的作用使红色粘土层之上的饱和土体发生轻微液化, 结果使剪切带 (滑动带) 土体抗剪强度迅速降低, 变形加剧, 滑体滑动速度增快。随着滑体滑动加快、饱和土液化程度加深 (滑动液化) 的过程不断进行, 最终导致 6 万多立方米土体 (固体成份及液化物质) 急剧下滑, 冲入黄河, 滑体又引起巨大的冲浪, 毁坏对岸良田。滑体的剧滑不仅造成灾害, 而且大大提高了滑面扰动带以及部分滑体的液化程

度 (根据探井揭示, 液化层厚度达 2—3 m)。在现场调查中发现未脱离滑床的滑体已呈流塑状, 并不断地向下流动, 形成黄土泥流。随着时间的推移, 滑坡后壁出现开裂并发生局部坍塌甚至次生滑坡。

在黄土地区由饱和黄土蠕动液化导致的高速滑坡很普遍。如甘肃盐锅峡的 10 km 长黑方台从 1987 年至今已发生 15 次这种类型的高速滑坡, 还有天水市的泰山庙滑坡、椒树湾滑坡、锻压机床厂滑坡及宁夏的塌株山农场滑坡等。

3 饱和黄土蠕动液化导致高速滑坡

前人的研究表明: 由于水的作用, 土的抗剪强度降低而导致高速滑坡。但其作用过程尚未详细说明。本文拟对这一问题进行分析。

3.1 饱和黄土蠕动液化的机理

在滑坡现场调查中发现, 位于第四系红色粘土层或第三系红色 (或灰绿色) 泥岩以上的黄土状粉砂土和马兰黄土 (以轻亚粘土为主) 多为松散饱和并处于难以排水的环境之中, 所以黄土状粉砂土 (粘聚力几乎为零) 的抗剪强度表示为:

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi = \sigma_e \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

式中的 τ 值为破坏面上的剪切力, σ 为破坏面上总压应力, u 为孔隙水压力, σ_e 为有效应力, φ 为内摩擦角。由于黄土状粉砂土比较松散, 受到滑坡体蠕动剪切力的作用, 土的骨架必然遭到破坏, 产生变形。又由于黄土状粉砂土饱和而孔隙水又不能排出, 部分围压转嫁于孔隙水产生孔隙

水压力。这时土体承受有效应力 σ_e 降低, 孔隙水压力等于围压, 土体抗剪强度为零。这时黄土状粉砂土不能承受任何剪应力, 与水混合成液化产物。

马兰黄土的抗剪强度可表示为

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c \quad (2)$$

粘聚力较弱的马兰黄土在滑坡体蠕动作用下, $\sigma_e = \sigma - u$ 可能在某一些时段内并未完全消失, 粘聚力不为零。所以抗剪强度并不完全消失, 变形不会无限增长, 这时的液化只是部分液化或液化程度不深。

我们也可以从另一个角度即土体结构内部强度的变化来分析液化的机理。这—问题是基于孔隙水压力改变的定量分析。事实上, 饱和黄土液化过程就是孔隙水压力发生、发展和消亡的过程。所以研究滑体蠕动液化的机理就是定量研究孔隙水压力的变化过程。

考虑一个饱和黄土状粉砂土样, 在直剪仪中受到一次荷载的作用。设 $\Delta \varepsilon_{vd}$ = 排水条件下净体积应变增量。对于一定的初始条件, 已经证明: $\Delta \varepsilon_{vd0}$ 主要是剪应变幅度的函数, 并可看作是由于颗粒接触处的滑动所致。在不排水条件下, 同样的剪应变幅值的荷载也会引起起间滑移, 产生同样的体应变增量 $\Delta \varepsilon_{vd0}$ 然而, 滑动变形必须将以往由颗粒间力承担的某些垂直应力传递到更加不可压缩的水上去, 当孔隙水压力增加时, 垂直有效应力的相应减小引起可恢复的体积应变增量 $\Delta \varepsilon_{vd}$ 的消除。这些应变增量就是以弹性变形的方式储蓄在颗粒接触处的。由于体积的相容条件, 在此循环的末尾, 必然导致:

$$\text{孔隙体积的改变} = \text{黄土状粉砂土结构的净体积变化} \quad (3)$$

如果 Δu = 剩余孔隙水压力的增量; K_w = 水的体积模量; n_e = 试样的孔隙率以及 \bar{E} = 一维卸载曲线上相应于初始垂直有效应力的点的切线模量, 那么考虑单位体积的黄土状粉砂土: 孔隙体积的改变 = $\Delta u_{ne} / K_w$, 由于滑动变形引起的黄土状粉砂土结构体积的增加 = $\Delta \varepsilon_{vr} = \Delta u / \bar{E}$, 因此从式 (3) 得:

$$\frac{\Delta u_{ne}}{K_w} = \Delta \varepsilon_{vd} - \frac{\Delta u}{\bar{E}_r} \quad (4a)$$

$$\text{或} \quad \Delta u = \frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\frac{1}{\bar{E}_r} + \frac{n_e}{K_w}} \quad (4b)$$

对于饱和试验, $K_w = 1.75 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, 设水 实际上是不可压缩的。因此在体积变化为零的条件下

$$\Delta \varepsilon_{vd} = \Delta \varepsilon_{vr} = \frac{\Delta u}{\bar{E}_r} \quad (5a)$$

$$\text{或} \quad \Delta u = \bar{E}_r \cdot \Delta \varepsilon_{vd} \quad (5b)$$

这个理论的实际应用的关键在于: $\Delta \varepsilon_{vd}$ 值与垂直应力无关。因此, 该理论以最简单的形式包含如下意义: 如果受到初始垂直有效应力 σ'_{v0} 的饱和黄土状粉砂土样具有可恢复的体积应变 ε_{vro} , 那么在排水条件下产生体应变 $\varepsilon_{vd} = \varepsilon_{vro}$, 在此条件下就会产生液化。

应用 (5) 式预测孔隙水压力, 就必须计算体应变增量。这个问题, M. L. Silver 等^[6] 曾进行过一系列的试验, 得出一些有用的结果。

3.2 饱和黄土蠕动液化的影响因素

大量滑坡引起饱和黄土液化的实例表明: 滑体规模的大小, 当然主要表现为滑体的厚度 (用沿滑面的剪切力表示) 和滑坡速度对饱和黄土液化程度的影响。为了模拟这一现象, 我们在甘肃

永靖县焦家崖头的斜坡上(滑坡旁边)挖了一探槽,让饱和土显露,利用一组尺寸不同的立方体土样盒,装上饱和黄土的原状土,反扣在显露的饱和土上,进行现场实验。结果表明:速度越快,液化程度越深;土样盒越大(即外界剪切力越大),液化程度越深。为了使问题研究得更加深入,我们进行了大量的土力学实验。

3.2.1 外界剪切力的影响

我们先用一组黄土状粉砂土样(配成 $S_r=85\%$)在室内应变直剪仪上作了剪切试验。当 $P_0=0.125 \text{ kgf/cm}^2$ 左右时,剪切面上出现水膜,也即液化开始,此时剪切应力强度 $\tau_0=0.075-0.08 \text{ kgf/cm}^2$ 。施加不同的压力,可得出不同的 τ 值(几组平均值,如图 2(a))。同理用马兰黄土($S_r=88\%$)在环剪仪上进行剪切试验,结果当正压力刚刚超过 $P_0=0.125 \text{ kgf/cm}^2$ 时,出现初始液化,此时的 $\tau_0=0.12-0.13 \text{ kgf/cm}^2$,结果如图 2(b)。

从图 2 可看出,不同类型、不同饱和度情况下的饱和土的抗剪强度不一样,并且初始液化的 τ_0 值不同。 P 越大、 τ 越大,而且液化程度随 τ 的增大而提高,这与我们的宏观分析及现场试验一致。

3.2.2 剪切速度的影响

为了模拟滑坡对液化程度的影响,我们在探槽里取了大量的试验样品(马兰黄土),在英国莱斯特大学黄土研究中心(Center for Loess and Documentation, University of Leicester)的土工实验室内的环剪仪上进行试验。试验结果如图 3。

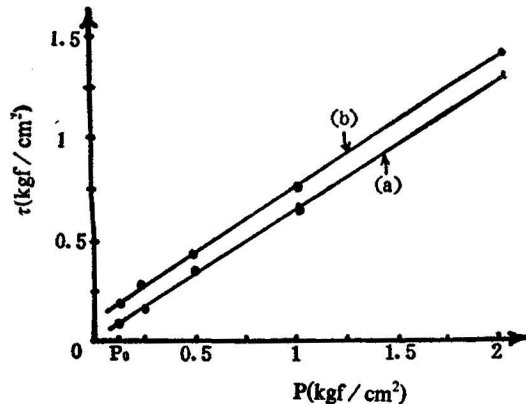


图 2 土的正压力和剪切力的关系曲线
Fig. 2 The relationship between normal pressure and shear-stress of soil

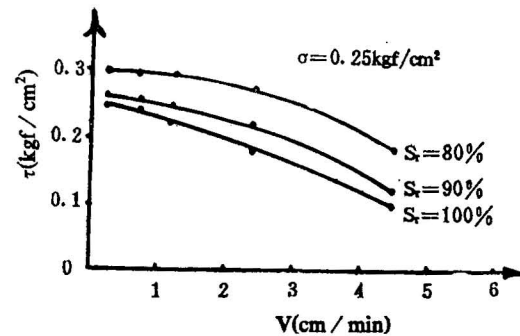


图 3 剪切速度与土的抗剪强度关系曲线
Fig. 3 The relationship between shear velocity and shearing strength of soil

上述试验样品为扰动样的残余强度。由于考虑到试验过程中固结及孔隙水消散的问题,所以选用正应力 $\sigma=0.25 \text{ kgf/cm}^2$ 。由图 3 可看出:速度越快、抗剪强度越低。这与宏观分析及现场试验结果是一致的。

3.2.3 饱和度的影响

目前国内外学者对地震液化时土的饱和度问题作了很多室内试验。结果表明:饱和度在 80% 以上的土同样有液化的特性,与完全饱和($S_r=100\%$)试件有极其相似的孔压发展和变形过程。故一般认为饱和度 80% 以上的土即可看作饱和土。由于滑动液化与地震液化只是外动力源不同罢了,所以它的影响因素(特别是内部因素和环境因素)与地震液化的情形一致,在此不必赘述。我们只是采集一些样品在室内环剪仪上试验。这里仅用饱和度来举例。

我们在甘肃盐锅峡采集了大量的轻亚粘土(相当于马兰黄土)样品,在英国莱斯特大学黄土中心的环剪仪上进行了一系列试验(图 4)。

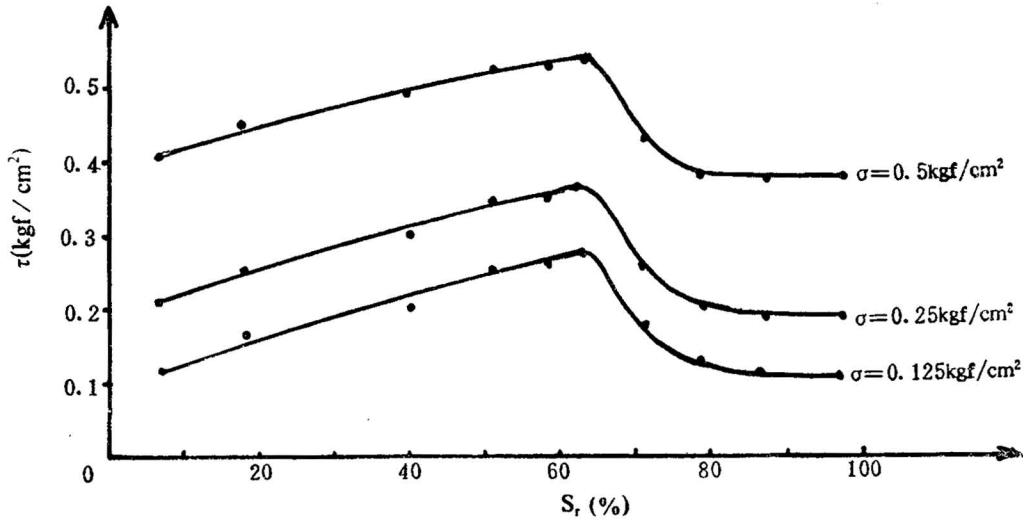


图 4 土的抗剪强度与饱和度的关系曲线

Fig. 4 The relationship between shearing strength and sturation grade of soil

我们从图 4 中可看出：饱和度从 65%（小于 65% 时与饱和度概念不符，无意义）开始，抗剪强度随饱和度的增加而逐渐减弱，当饱和度越过 80% 时， τ 值几乎不变，这就是说，当饱和度为 80% 以上时，可以看作饱和状态，具有液化的特征。这与地震液化时，M. L. Silver 等人的结论一致。

3.3 饱和黄土蠕动、滑动液化导致高速滑坡的过程

由于饱和黄土蠕动或滑动液化导致的高速滑坡往往要经历一系列的过程，用下述步骤表示为：

灌溉或强降雨——→形成饱和带——→降低黄土的 c 、 φ 值并在黄土层内形成滑裂面——→引起滑体蠕动变形——→饱和黄土轻微液化——→滑体滑动——→液化程度加深（至完全液化）——→滑体高速滑动——→黄土泥流产生。

下面我们来分析这个过程。

在大量的野外调查中发现：黄土滑坡往往是“二元结构”，它们都是在不同的阶地上发生。滑坡结构自上而下的地层依次为：马兰黄土、黄土状粉砂土，红色粘土层、砾石层、第三系（或白垩系）泥岩，有时是黄土直接与泥岩接触。而泥岩的倾向往往与坡向一致，倾角 5° — 15° 。降雨或灌溉沿地表裂隙或落水洞灌入，在红色粘土层或第三系泥岩（该层有良好的隔水性能）以上形成一饱和层。这个饱和层的长期滞留，对黄土的强度有削弱作用（即降低黄土的 c 、 φ 值）并在黄土层内形成滑裂面。由库伦定律可知，黄土的 c 、 φ 值减小，其抗剪强度 τ 值必然降低，其结果会使高陡斜坡体在重力作用下产生蠕动变形。饱和土层在外动力作用之前，土骨架没有产生滑移，外界重力全部由土骨架来承担，一旦有蠕动所产生的剪切力作用，土颗粒就会产生滑移、改变排列状态，产生孔隙水压力，导致有效应力降低，产生轻微液化。轻微液化的结果加速了滑坡体变形的发展产生滑移。随着滑移速度的提高，产生的孔隙水压力不断增加，有效应力不断降低。这种状况持续发展，循环往复，直至有效应力消失，总应力等于孔隙水压力，饱和黄土完全液化。此时不但外力全部由孔隙水来承担，而且土颗粒本身的重量也施加于孔隙水上，产生液化物质。这种物质接近液体，不能承受任何剪切力，而只依靠非常微弱的粘滞力起阻碍作用。这时

便会发生高速滑坡。接着便有残留于滑床上的液化物质在高速滑体的带动下产生黄土泥流。

由于饱和土层在没有外力的作用下仅降低黄土的 c 、 φ 值, 因此可从下式中 c 、 φ 值的变化分析土抗剪强度 τ 的降低原因。

$$\tau = \sigma_c \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi + c \quad (6)$$

而饱和土层在外界力的作用下, 往往产生液化作用, 可从上式中的 $(\sigma - u)$ 的变化来分析 τ 值降低的原因。这两种现象都是导致高速滑坡的原因。有时是这种起主导作用, 有时是那种起主导作用, 大多数情况下是二者兼而有之。

4 有关滑坡速度及泥流速度的讨论

4.1 有关高速滑坡的速度问题

笔者曾对无水作用下的均质滑体的滑动轨迹及滑动速度进行过定量分析^[5]。文中是从能量的观点出发, 根据变分原理推导出滑坡速度的一、二级近似解如下:

一级近似解:

$$v_1 = \sqrt{2g \left[a_1 \frac{x}{l} (2l - x) - \mu x \right]} \quad (7)$$

二级近似解:

$$v_2 = \sqrt{2g \left\{ \frac{x}{l} [a_1 (2l - x) + a_2 (3l^2 - x^2)] - \mu x \right\}} \quad (8)$$

式中的 a_1 , a_2 是常系数, 由具体实例的一些已知参数通过解方程组可求得。1 是滑体质点滑动的水平距离。 μ 是动摩擦系数, 一般情况下, 动摩擦系数是无法用实验求得的, 可用反算法。

μ 值必须符合:

$$\mu \leq \frac{h}{l} \quad (9)$$

式中的 h 是滑体质点滑动的垂直距离。

另外, 我们根据实际情况知, 当 $x_{\max} = l$ 时, $v = 0$ 。即滑体质点停止时, 速度为零。

$$\text{即 } v_2 = \sqrt{2g \left\{ \frac{x}{l} [a_1 (2l - x) + a_2 (3l^2 - x^2)] - \mu x \right\}} = 0 \quad (10)$$

解方程 (10) 得

$$\mu = a_1 + 2a_2 l \quad (11)$$

当滑床是完全液化物质时, 动摩擦系数非常小, 仅是流塑状体的粘滞力在起作用。有关如何求取粘滞性流体的动摩擦系数, 在此不作讨论。

4.2 有关黄土泥流的速度问题

滑床上的液化物质在高速滑坡的带动下产生泥流。设液化物质带厚为 b , 如图 5 所示。由于上部固体滑块在 X 方向以速度 v 运动所引起的流动, 设 u 为黄土泥流的流动速度并与 x 无关, 只是 y 的函数, 那么体力势 $\Omega = gy$, 流体运动方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + \rho \frac{\partial \Omega}{\partial x} &= \frac{\partial P}{\partial x} - \rho g \sin \beta \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= -\rho g \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 P 为上覆压力, ρ 为流体密度, β 为 x 轴的倾斜角度。

若记
$$\frac{\partial P}{\partial x} = -K$$

则
$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} = -K - \rho g \sin \beta \quad (13)$$

解方程并由边界条件确定积分常数得流体速度为

$$\mu = \frac{vy}{b} + \frac{K + \rho g \sin \beta}{2\mu} y(b-y) \quad (14)$$

式 (14) 是假设密度 ρ 及粘滞系数 μ 都为常数的情况下成立。

若 ρ 不是常数而是 y 的函数, 则

$$\mu u = - \int_0^y \int_0^{y'} \rho(y'') g \sin \beta dy'' dy' - \frac{K}{2} y^2 + c_1 y + c_2 \quad (15)$$

若下部红色粘土层或泥岩层不动, 则 $c_2 = 0$, c_1 由在上边界的条件所确定。

若 ρ, μ 都是 y 的函数, $\frac{\partial P}{\partial x}$ 是常数, 则

$$\frac{d}{dy} \left(\mu \frac{du}{dy} \right) = -K - \rho g \sin \beta \quad (16)$$

解之得

$$u = - \int_0^y \left\{ \frac{1}{\mu(y')} \int_0^{y'} [K + \rho(y'') g \sin \beta] dy'' \right\} dy' + cy \quad (17)$$

式 (17) 满足条件: 当 $y=0$ 时, $u=0$, 其中常数 c 可由满足上边界条件来确定。

本文得到张成恭、张倬元、王恭先等教授的指导, 在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 Skempton A W. Bedding—plane—slip, residual strength and Vajont slide. *Geotechnique*, 1966, (16): 82—84.
- 2 Romero S V, Molan R. Kinematic aspects of the Vajont slide. In: *Proc. of 3rd International Congress on Rock Mechanics*, Dever, 1974, 2(B).
- 3 黄润秋, 王士天, 张倬元. 斜坡岩体高速滑动的“滚动摩擦”机制. 见韩文峰, 聂德新, 刘汉超编. *工程地质新进展*. 成都: 成都科技大学出版社, 1989. 318—325.
- 4 张佳川, 周瑞光. 滑坡运动分析. 见韩文峰, 聂德新, 刘汉超编. *工程地质新进展*. 成都: 成都科技大学出版社, 1989. 277—287.
- 5 王家鼎, 黄海国, 阮爱国. 滑坡体滑动轨迹的研究. *中国地质灾害与防治学报*, 1991, 2 (2): 1—10.
- 6 Silver M L. Laboratory triaxial testing procedures to determine the cyclic strength of soils. *June*, 1977. 1—27.
- 7 易家训. *流体力学*. 北京: 高等教育出版社, 1982. 223—234 页.

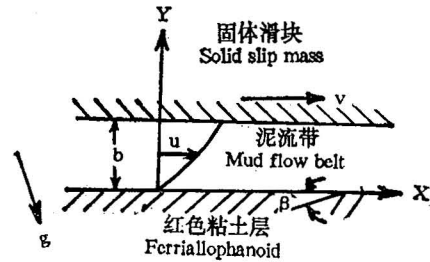


图 5 泥流流速示意图
Fig. 5 The sketch map of mud flow velocity

A MECHANISM OF HIGH-SPEED LOESS LANDSLIDES —SATURATED LOESS CREEPING LIQUEFACTION

Wang Jiading

(*Geological Hazards Institute, Gansu Academy of Science, Lanzhou, Gansu*)

Abstract

In this paper, the author proposes a mechanism of highspeed loess landslides—saturated loess creeping liquefaction. A number of examples of Gansu are given and its mechanism is analysed from changes of the inner intensity of loess structure and stress conditions before and after saturated loess is subject to the stress. It is proved by field and laboratory tests that the liquefaction degree of saturated loess is increased with the growth of shearing stress, shearing velocity and degree of saturation and that the initial liquefaction critical value of saturated loess varies from 0.075 to 0.13 kgf/cm². Because the properties of loess with a saturation degree of more than 80% are in keeping with those of loess with 100% saturation, it is suggested that the soil with a saturation degree of more than 80% is saturated soil. Besides, the author proposes the following process of high-speed landslide triggered by saturated loess creeping and sliding liquefaction: irrigation or heavy raining→formation of saturated loess belt→decrease in c and φ values of and formation of slip surfaces in loess bed→creeping of slide body→slight liquefaction→sliding→high-degree liquefaction to complete liquefaction→high-speed sliding→production of mud flow. Finally, the velocity of high-speed landslides and mud flow is discussed.

Key words: high-speed loess landslide, saturated loess creeping liquefaction, mud flow

作者简介

王家鼎, 1962年7月生。1986年7月毕业于国家地震局兰州地震研究所工程地震专业, 获硕士学位。现在甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所从事地质灾害防治方面的科研工作, 任助研、兼职副研。目前已在国内外学术刊物上发表论文近30篇。通讯地址: 兰州市定西南路77号, 甘肃省科学院防灾所。邮政编码: 730000。