

泥石流成因机理的非饱和土力学理论研究¹

戚国庆 黄润秋

(成都理工大学环境与土木工程学院, 成都, 610059)

[摘 要] 泥石流是一种具有较强破坏力的自然山地灾害。对于它的预报研究历来为人们所重视, 并建立了很多雨量预报模型。然而, 这些雨量预报模型的预报时间很短, 往往只能在灾害发生前几十分钟作出预报。本文应用非饱和土强度理论对降雨型泥石流的成因机理进行了研究, 提出降雨型泥石流的形成过程可以划分为两个阶段, 第一个阶段与前期实效降雨量有关, 第二个阶段与短历时强降雨有关。并对各个阶段降雨作用机理以及固体松散物质的力学性质变化特征进行探讨。为预先判断在降雨条件下, 发生泥石流以及所需要的降雨条件和雨型提供依据。

[关键词] 泥石流, 非饱和土, 基质吸力。

1 引言

泥石流是一种携带大量泥土和碎屑物质的间歇性洪流^[1]。与一般的挟沙水流相比, 泥石流中固体物质含量高, 颗粒粒径分布范围广, 可能有从几微米直至几米的变化范围。一般挟沙水流中的颗粒粒径分布呈单峰型, 且符合正态分布; 而对固体含量较高的泥石流, 粒径分布多为双峰型^[2]。

诱发泥石流的外界因素有降雨、融雪、溃坝、地震等。其中以降雨引起的泥石流(称降雨型泥石流)分布最广, 活动最频繁, 因此是泥石流研究的主要对象^[3]。

泥石流是降雨、地形地貌、固体松散堆积物等因素共同作用的结果。当除降雨以外的其它因素达到某种程度时, 一旦有足够大的降雨量, 就可能发生灾害性的泥石流^[4]。降雨为这类泥石流形成的主要诱发因素, 而其它因素则是形成降雨型泥石流必不可少的基本条件, 为基本因素。

泥石流是常见的一种自然山地灾害, 以其突发性和破坏力强为人们重视。泥石流灾害的防治首先要对其进行准确预报, 而泥石流灾害的准确预报, 则必须建立在对其形成机理深入研究的基础之上。运用非饱和土强度理论, 将降雨型泥石流的形成过程划分为两个阶段, 即: 降雨型泥石流的固体松散物质中由基质吸力引起的抗剪强度丧失阶段和孔隙水压力增大引起的抗剪强度降低、发生泥石流阶段。文章以此为基础, 对降雨型泥石流的形成机理进行探讨。

2 从非饱和土力学理论认识泥石流物质的强度特征

2.1 泥石流物质的抗剪强度

泥石流的固体松散物质在泥石流形成之前, 往往处于非饱和状态。依据(Fredlund等, 1978)非饱和土抗剪强度公式^[5], 其抗剪强度可以表示为:

¹国家自然科学基金重大研究计划项目资助(项目编号: 90102002)

$$\tau = C' + (\sigma_f - u_a)_f \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \phi^b \quad (1)$$

式中：\$C'\$ 为 Mohr - Coulomb 破坏包线的延伸与剪应力轴的截距，在剪应力轴处的净法向应力和基质吸力均为零，\$C'\$ 也称为有效粘聚力。由于固体松散物质无胶结，有效粘聚力 \$C'\$ 很低；\$\sigma_f\$ 为破坏时在破坏面上的法向总应力；\$u_a\$ 为破坏时在破坏面上的孔隙气压力；\$u_w\$ 为破坏时在破坏面上的孔隙水压力；\$(\sigma_f - u_a)_f\$ 为破坏时在破坏面上的净法向应力状态；\$(u_a - u_w)_f\$ 为破坏时破坏面上的基质吸力；\$\phi'\$ 为与净法向应力状态变量 \$(\sigma_f - u_a)_f\$ 有关的内摩擦角；\$\phi^b\$ 为表示抗剪强度随基质吸力 \$(u_a - u_w)_f\$ 而增加的速率；\$(u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \phi^b\$ 为基质吸力 \$(u_a - u_w)_f\$ 引起的抗剪强度。

关于由基质吸力 \$(u_a - u_w)_f\$ 引起的抗剪强度，在第一届非饱和土国际会议上，许多学者建议了非饱和土抗剪强度的非线性表达式。沈珠江认为用双曲线公式表达基质吸力对抗剪强度的贡献可能更为实用^[6]：

$$\tau_{us} = \frac{(u_a - u_w)}{1 + d(u_a - u_w)} \operatorname{tg} \phi' \quad (2)$$

式中：\$d\$ 为实验常数。

2.2 降雨过程中固体松散物质的基质吸力变化

降雨过程中形成泥石流的固体松散物料的基质吸力变化，实际上就是非饱和土基质吸力随含水量的变化关系。也被称为土 - 水特征曲线。包承纲等建议以对方程来表征土 - 水特征曲线^[7]为：

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b} \quad (3)$$

其中 \$(u_a - u_w)_r\$ 为残余含水量 \$\theta_r\$ 所对应的基质吸力；\$(u_a - u_w)_b\$ 为土的进气值；\$(u_a - u_w)\$ 为非饱和土基质吸力；\$\theta\$ 为体积含水量；\$\theta_s\$ 为饱和体积含水量。

若将公式 (3) 化为：

$$(u_a - u_w) = \frac{(u_a - u_w)_r}{\left[\frac{(u_a - u_w)_r}{(u_a - u_w)_b} \right]^{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}}} \quad (4)$$

由公式 (4) 可以看出：当 \$\theta = \theta_r\$ 时，\$(u_a - u_w) = (u_a - u_w)_r\$，即，非饱和土含水量为残余含水量 \$\theta_r\$ 时，基质吸力 \$(u_a - u_w)\$ 为 \$(u_a - u_w)_r\$；当 \$\theta = \theta_s\$ 时，\$(u_a - u_w) = (u_a - u_w)_b\$，即，非饱和土含水量为饱和含水量 \$\theta_s\$ 时，基质吸力 \$(u_a - u_w)\$ 为 \$(u_a - u_w)_b\$；当非饱和土含水量在残余含水量 \$\theta_r\$ 与饱和含水量 \$\theta_s\$ 之间变化时，基质吸力 \$(u_a - u_w)\$ 便在 \$(u_a - u_w)_r\$ 与 \$(u_a - u_w)_b\$ 之间变化。也就是说，在边坡降雨入渗的过程中，边坡非饱和区物质的基质吸力随着含水量的变化而变化。

2.3 降雨过程中非饱和固体松散物质的抗剪强度变化

(1) 由基质吸力引起的抗剪强度变化

在降雨过程中，处于非饱和状态的固体松散物质的含水量 θ 不断增加，使得其基质吸力 $(u_a - u_w)_r$ 下降，进而导致非饱和固体松散物质由基质吸力引起的抗剪强度不断降低。依据 Fredlund (1978) 非饱和土抗剪强度公式[公式 (1)]，非饱和固体松散物质由基质吸力引起的抗剪强度随含水量的变化规律为：

$$\tau = \frac{(u_a - u_w)_r}{\left[\frac{(u_a - u_w)_r}{(u_a - u_w)_b} \right]^{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}}} \lg \phi^b \quad (5)$$

依据沈珠江双曲线公式[式 (2)]，非饱和固体松散物质由基质吸力引起的抗剪强度随含水量的变化规律为：

$$\tau_{us} = \frac{(u_a - u_w)_r}{\left[\frac{(u_a - u_w)_r}{(u_a - u_w)_b} \right]^{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} + d(u_a - u_w)_r} \lg \phi' \quad (6)$$

由公式 (5)、公式 (6) 可以看出：非饱和固体松散物质由基质吸力引起的抗剪强度随含水量的变化关系为负指数关系。

(2) 固体松散物质饱和后的抗剪强度变化

降雨具有一定历时后，非饱和固体松散物质含水量增加，并达到饱和后，含水量继续增加，将在固体松散物质中产生孔隙水压力 u_w ，降雨渗入边坡的水量越多，孔隙水压力 u_w 越大。因此，非饱和固体松散物质的抗剪强度随孔隙水压力的变化关系为：

$$\tau = C + (\sigma - u_w) \lg \phi \quad (7)$$

式中， C 为饱和固体松散物质的粘聚力； ϕ 为饱和固体松散物质的内摩擦角。

在达到饱和状态后，固体松散物质中的水量越多，孔隙水压力 u_w 越大，其抗剪强度也就越低。

3. 泥石流的形成机理分析及其预测评价

降雨型泥石流的形成可分为两个阶段：第一个阶段，非饱和固体松散物质由于含水量持续增加，达到饱和状态，基质吸力引起的抗剪强度丧失阶段；第二个阶段，饱和的固体松散物质由于含水量持续增加，水压力增大，有效应力减小，发生泥石流。

(1) 固体松散物质由基质吸力引起的抗剪强度丧失

降雨型泥石流形成的第一阶段，固体松散物质含水量的增加与前期实效降雨量关系密切。前期实效降雨量^[8] P_a 由当日降雨量 H_{24} 以及之前若干日降雨量 P_t (赋存于固体物质中) 的剩余部分组成。

$$P_a = H_{24} + \sum_{t=1}^n P_t R^t \quad (8)$$

其中， R 为递减系数； n 为前期降雨影响期。

递减系数和前期降雨影响期，应依据当地气候条件和固体松散物质的组成岩性、含水量、孔隙率、渗透系数、基质吸力来确定。

依据公式 (4), 固体松散物质含水量 θ 的增加, 将使得其基质吸力降低。公式 (5) 公式 (6) 显示了固体松散物质由基质吸力引起的抗剪强度的丧失规律。基质吸力引起的抗剪强度的丧失与前期实效降雨量有关。

前期实效降雨量的作用主要是使固体松散物质达到饱和状态。在这一阶段, 由于没有足够的含水量, 不会发生泥石流。但有可能发生固体松散物质构成的斜坡的位移变形, 以及斜坡稳定性降低、滑坡。

(2) 固体松散物质孔隙水压力增大引起的抗剪强度降低, 发生流动

降雨型泥石流的发生是前期实效降雨量和短历时雨强共同作用的结果。当前期实效降雨使固体松散物质达到饱和状态后, 就进入了降雨型泥石流形成的第二阶段。此时, 饱和的固体松散物质启动与否的判别式^[9]为:

$$K = \frac{(\sigma - u_w) \tan \phi + AC}{T + G \sin \beta} \quad (9)$$

其中: A 为固体松散物质与沟床的接触面积; G 为固体松散物质重量; T 为水流推力, 其值较小, 为次要影响因素; β 为沟床底坡坡度; K 为固体松散物质稳定性系数, 当 $K = 1$ 时, 饱和固体松散物质处于极限状态; 当 $K > 1$ 时, 饱和固体松散物质处于稳定状态, 不会发生泥石流; 当 $K < 1$ 时, 饱和固体松散物质处于不稳定状态, 将会发生泥石流。

公式 (9) 反映了降雨型泥石流启动与否的力学机制, 在这一阶段, 短时间的具有一定强度的降雨使得渗入固体松散物质中的水量来不及排出, 加上周围降雨汇流的作用, 固体松散物质将启动, 形成泥石流。因此, 在降雨型泥石流预报模型中应考虑短期强降雨的影响。如蒋家沟模型^[10]:

$$\begin{cases} R_{10} = 5.5 - 0.098(P_a + H_{24}) > 0.5 \text{mm (临界线)} \\ R_{10} = 6.9 - 0.123(P_a + H_{24}) > 1.0 \text{mm (暴发线)} \end{cases} \quad (10)$$

式中, R_{10} 为 10 分钟降雨量 (mm); 实效降雨量 P_a 为 20 天内的有效降雨量, 递减系数 $R = 0.8$ 。

公式 (10) 预报提前时间为 17 ~ 20 分钟, 报准率为 86%, 错报 3%, 漏报为 11%。

由成昆铁路甘洛试验区 64 次观测资料确定的泥石流形成降雨量组合指标^[11]为:

$$R = K \left(\frac{H_{24}}{H_{24}(D)} + \frac{H_1}{H_1(D)} + \frac{H_{1/6}}{H_{1/6}(D)} \right) \quad (11)$$

式中: K 为前期降雨修正系数, $K \geq 1$, 在甘洛试验区 $K = 1$; H_{24} , H_1 , $H_{1/6}$ 分别为

24 小时, 1 小时, 10 分钟最大降雨量 (mm), $H_{24}(D)$, $H_1(D)$, $H_{1/6}(D)$ 分别为 24

小时, 1 小时, 10 分钟单因子临界雨量阈值, 随沟谷和地区而不同, 在甘洛试验区, 它们分别为 60mm, 20mm 和 10mm; R 为降雨量综合指标, 当 $R < 2.8$ 时, 不会发生泥石流; $R \geq 3.6$ 时, 发生泥石流的几率约占 85%; $R = 2.8 \sim 3.6$ 时, 有可能发生泥石流。

4 结论

当形成泥石流的物质条件 (按一定坡度堆积的固体松散物质、一定的汇水面积等

条件)具备时,泥石流的发生是前期实效降雨量和短历时强降雨共同作用的结果。依据非饱和土强度理论,可将降雨型泥石流的形成划分为两个阶段:第一个阶段,非饱和固体松散物质由于含水量持续增加,达到饱和状态,基质吸力引起的抗剪强度丧失阶段。该阶段与前期实效降雨量有关,前期实效降雨量的作用使固体松散物质达到饱和状态。在这一阶段,由于没有足够的水量,不会发生泥石流,但有可能发生固体松散物质构成的斜坡的位移变形,以及斜坡稳定性降低、滑坡。第二个阶段,饱和的固体松散物质由于含水量持续增加,水压力增大,有效应力减小,发生泥石流。与短历时强降雨有关。短时间的具有一定强度的降雨使得固体松散物质中渗入的水量来不及排出,加上周围降雨汇流的作用,固体松散物质将启动,形成泥石流。

应用非饱和土力学原理研究降雨型泥石流形成机理的优点是:可以通过对可能形成泥石流的固体松散物质的非饱和物理力学性质的研究,来预先判断在降雨条件下,会不会发生泥石流以及所需要的降雨条件和雨型,从而为泥石流的准确预报提供更强有力的理论依据。作者将在今后的研究中进一步加强这一理论在泥石流领域的应用研究。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准,工程地质术语,GB—91。国家技术监督局。1991。
- [2] 倪晋仁,王光谦。泥石流的结构两相流模型: . 理论[J]。地理学报。1998,53(1):66~76。
- [3] 高 速,周平根,董 颖。泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析[J]。工程地质学报。2002,10(03):279~283。
- [4] 魏永明,谢又予。降雨型泥石流预报(水石流)模型研究[J]。自然灾害学报。1997,6(4):48~54。
- [5] D.G 弗雷德隆德, H. 拉哈尔佐. 合著。 陈仲颐等译。 非饱和土力学[M]。 中国建筑工业出版社。
- [6] 徐永福,刘松玉。非饱和土强度理论及其应用[M]。东南大学出版社。1999,11。
- [7] Fredlund D G Xing A. Equations for the soil - water characteristic curve[J].Can. Geotech.J.1994,31:521~532.
- [8] 李德基,张德华。四川省宁南县城后山泥石流激发雨强[J]。山地研究。1994,12(1):15~19。
- [9] 白志勇。泥石流松散物质启动条件的分析与计算[J]。西南交通大学学报。2001,36(03):318~321
- [10] 崔鹏,刘世建,谭万沛。中国泥石流监测预报研究现状与展望[J]。自然灾害学报。2000,9(2):10~15。
- [11] 谭炳炎,段爱英。山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]。自然灾害学报。1995,4(2):43~52。