

文章编号: 1004-4574(2008) 03- 0117- 08

# 降雨作用下浅层碎石土滑坡解体破坏机理研究

许建聪<sup>1</sup>, 尚岳全<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为了揭示浅层碎石土滑坡的变形解体破坏机理, 通过资料搜集整理与分析、现场工程地质调查与勘探和室内外的物理力学试验, 采用数理统计分析方法、不平衡推力法和不分离接触弹塑性有限元强度折减法, 获得了滑坡的整体稳定性系数; 运用碎石土边坡地下水管网状排泄系统的理论, 分析了该类型滑坡的变形解体破坏过程, 揭示了强降雨作用下浅层碎石土滑坡变形解体破坏的主要机理和一般的力学机理。结果表明, 浅层碎石土滑坡的解体破坏过程中, 滑体位移、滑体沿滑面滑动状态和塑性应变的发展以及滑面上摩擦应力的发挥程度是不一致的; 强降雨是浅层碎石土滑坡体发生失稳的主要触发因素; 采用弹塑性接触有限元算法可以更好地反映该类型滑坡在降雨作用下所处的实际状态及滑坡的滑动过程, 为该类型滑坡稳定性的准确评价和预测预报提供可资借鉴的方法。

**关键词:** 岩土力学计算; 浅层滑坡; 弹塑性有限元; 接触算法; 解体破坏

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

## Study on mechanism of disintegration and failure of shallow debris landslide under rainfall action

XU Jian-cong<sup>1</sup>, SHANG Yue-quan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** In order to reveal the mechanism of disintegration deformation and failure of shallow debris landslide through the collection, arrangement and analysis of related data, the in situ investigation and exploration of engineering geology, indoor and outdoor physical mechanics test, adopting mathematic statistics, disequilibrium thrust method and non-separation contact elastoplastic FEM strength reduction method, the integral stability coefficient of this debris landslide was derived, and its process of the deformation, disintegration and failure was analyzed, in which the mechanism of deformation, disintegration and failure is revealed. The results are shown as follows: First, the disintegration deformation and failure of shallow debris landslide is mainly caused by discordant slip-mass displacement, discordant slip-mass sliding state along sliding plane, and ever-developing plastic strain and its discordant development. Second, the utilization degree of contact friction stress on sliding plane is discordant in the course of disintegration deformation and failure of shallow debris landslide. Third, adopting contact elastoplastic FEM algorithm may better reflect the actual locating state and sliding process of shallow debris landslide under the action of rain, and it may afford one method that can be used as a reference of the stability analysis, accurate evaluation and forecast of this type of landslide.

**Key words** Geo-technical mechanics computation, shallow landslide, elastoplastic finite element method, contact

收稿日期: 2007- 07- 15 修订日期: 2007- 11- 13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40372118)

作者简介: 许建聪 (1967- ), 男, 博士, 工程师, 主要从事岩土工程与工程地质、地下结构工程、防灾减灾工程及防护工程等研究。E-mail: xjc0702@163.com.

algorithm; disintegration and failure

斜坡发生失稳破坏是一种复杂的地质灾害过程。由于滑坡内部结构的复杂性和组成滑坡岩土体物质的不同,造成滑坡破坏具有不同的模式。对于不同的破坏模式就存在不同的滑动面,因此必须根据不同的滑坡破坏模式选择不同的物理力学模型和算法分析滑坡的稳定性和计算滑坡的稳定性系数。

滑坡是坡体因多种因素耦合而发生的形变,最终被某些诱发因素激发失稳产生滑动的一种灾害地质现象。强降雨是滑坡,尤其是浅层堆积物滑坡发生发展的一个重要外部条件。较多情况下,强降雨是浅层堆积物滑坡发生破坏的主要诱因,对堆积体的初始位移激发、间歇性蠕变、滑动变形,以及失稳剧滑的各个阶段都有不小影响。浅层堆积物滑坡特定的物质组成、结构性状及厚度条件等决定的降雨入渗速度、下伏滑床面汇流状况及水力影响程度,最终导致了这类滑坡对降雨的特殊敏感性<sup>[1]</sup>。我国大多数浅层滑坡都是由于降雨下渗,引起地下水状态、坡体及滑带介质的物理力学性质发生改变而诱发产生的。在对长江三峡库区 1982 年 7 月暴雨诱发的 80 多个典型滑坡的发生时间和降雨历时的统计分析中发现,在暴雨开始之后 10~12 h 内发生滑坡的多为浅层堆积土、堆填土和粘土滑坡<sup>[2]</sup>。如浙江省乐成滑坡是在强降雨条件下发生滑动的,每当强降雨时,滑坡变形破坏就加速,而当一段时间天气晴好时,变形破坏又趋停止。

由以上分析可知,降雨,特别是强降雨是滑坡,尤其是浅层滑坡最关键的触发因素。

为了揭示浅层碎石土滑坡的变形解体破坏机理,针对该类型滑坡的特殊破坏模式,在资料搜集整理和分析、现场工程地质调查与勘探和室内外的物理力学试验的基础上,拟采用数理统计分析方法、不平衡推力法和不分离接触弹塑性有限元强度折减法,结合浙江乐成浅层碎石土滑坡的工程实例,分析该类型滑坡在降雨作用下的解体变形破坏的机理,以便获得大量该类型滑坡变形破坏机制的有用信息,为人工边坡设计和滑坡治理提供技术保证,为预测滑坡变形破坏发展趋势提供分析方法,为正确判断浅层碎石土滑坡失稳成灾的可能性提供科学依据,为该类型滑坡的稳定性分析评价及预测预报提供可资借鉴的方法。

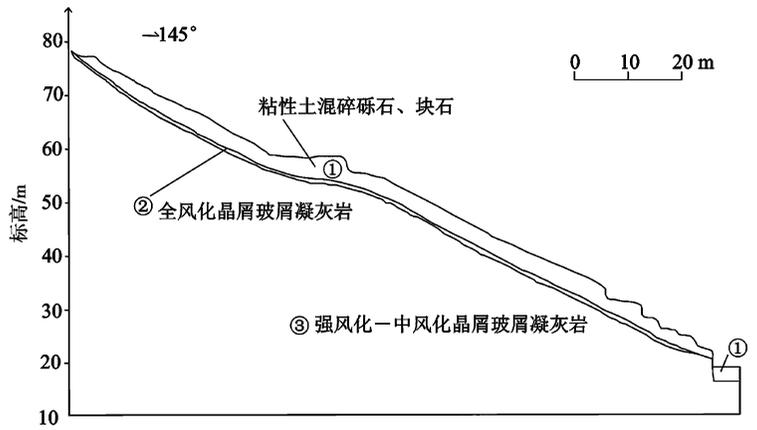


图 1 滑坡工程地质横剖面图

Fig 1 Engineering geological transverse section of landslide

为人工边坡设计和滑坡治理提供技术保证,为预测滑坡变形破坏发展趋势提供分析方法,为正确判断浅层碎石土滑坡失稳成灾的可能性提供科学依据,为该类型滑坡的稳定性分析评价及预测预报提供可资借鉴的方法。

## 1 滑坡工程地质条件

乐清市乐成浅层碎石土滑坡发生于 1997 年 8 月 17 号强台风暴雨期间,滑体长 24~82 m,前缘宽 20~28 m,中部宽 18~27 m,滑体表面呈波状起伏。总体坡度 22.6~27.8°,滑坡的体积大于 3000 m<sup>3</sup>,滑坡体的厚度一般都小于 6 m,属小型浅表层土质滑坡。

乐成浅层滑坡滑体由粘性土混碎砾石、块石组成,滑面带主要由全风化晶屑玻屑凝灰岩组成。该滑坡是悬挂型滑坡,滑动后有的后壁成为第二个潜在滑坡的有效临空面,剪出口位置多在山坡上。该滑坡的工程地质剖面图如图 1 所示。

## 2 弹塑性接触有限元算法模型的选择

近些年来,随着计算机技术的发展,以有限元分析为主的数值分析技术被广泛地应用于滑坡问题的各类研究中。已有的研究主要可归纳为两类:(1)利用弹塑性有限元分析方法,研究滑坡体的应力场和位移

场<sup>[3]</sup>; (2) 利用强度折减法, 研究基于有限元方法的滑坡稳定性系数评价方法<sup>[4-5]</sup>。上述研究取得了一定的成果, 推动了有限元方法在滑坡稳定性评价中的应用。接触有限元算法是非线性有限元的一个重要分支。近年来被广泛应用于土木工程中土与结构相互作用的数值模拟中, 在土与基础、土体与挡土结构、土体与防渗结构之间的界面模拟中取得了一定的成果<sup>[6]</sup>。

由于浅层碎石土滑坡滑体总是沿下伏岩层面滑动, 所以分析该类型滑坡解体破坏过程时, 只有采用解决高度状态非线性问题的接触算法, 才能对该类型滑坡所处的实际状态进行准确的评价。

通过强度折减, 折减后的抗剪强度指标逐步减小, 反复对滑坡进行分析, 首先部分单元开始屈服, 应力在单元之间重新分配, 滑坡中岩土体局部失稳逐渐发展, 直到某一个临界状态, 在虚拟的折减抗剪强度下整个滑坡发生失稳。那么在发生整体失稳之前的那个折减系数值, 即岩土体的实际抗剪强度指标与发生虚拟破坏时折减强度指标的比值, 就是这个滑坡的稳定性系数。这种稳定性分析方法称为有限元强度折减法。这里定义的抗剪强度折减系数, 与极限平衡法分析中所定义的滑坡稳定性系数在本质上是一致的<sup>[7-8]</sup>。使用有限元强度折减法不仅可以直接得出滑坡的稳定性系数, 不需要事先假设滑裂面的形状和位置, 还可以得到滑坡内各单元的应力和变形情况, 给出岩土体的破坏区域, 从而大致给出破坏面的位置。

所谓强度折减技术就是用一个折减系数  $F_s$  对滑体或滑带的岩土体抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  进行折减, 如式 (1), (2), 然后用折减后的虚拟抗剪强度指标  $c_F$  和  $\varphi_F$  取代原来的岩土体抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  在有限元数值分析中使用。

$$c_F = c / F_s \tag{1}$$

$$\varphi_F = \arctan(\tan(\varphi) / F_s) \tag{2}$$

式中,  $c$  是岩土体的粘聚力 (Pa),  $\varphi$  是岩土体的内摩擦角 ( $^\circ$ )。

在弹塑性接触有限元数值计算中最关键的是选择一个正确的屈服准则。根据文献 [9] 介绍, 不同屈服准则所得的稳定性系数的相对误差最高达 63.2%。Drucker-Prager 屈服准则是一种经过修正的 Mises 屈服准则, 既考虑了中间主应力  $\sigma_2$  对屈服强度的影响, 又考虑了静水压力 (侧限压力) 对屈服强度的影响。静水压力越高, 则屈服强度越大, 对土体材料有较好的适用性, 已被广泛应用于土体稳定性分析中<sup>[10]</sup>。因此, 在浅层碎石土滑坡的稳定性数值分析计算中, 一般可以选择 Drucker-Prager 屈服准则作为屈服函数和塑性势函数的本构模型, 屈服函数表达式如式 (3)。Drucker-Prager 模型, 简称 D-P 模型。

$$F = 3\beta\sigma_m + [\frac{1}{2}S^TMS]^{1/2} - \sigma_y = 0 \tag{3}$$

式中:  $F$  为屈服函数;  $M = Mises$  屈服准则中的  $M$ ,  $S =$  偏差应力,  $\sigma_y = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ ,  $\sigma_m =$  静水压力  $= \frac{1}{3}(\sigma_x +$

$\sigma_y + \sigma_z)$ ,  $\beta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ 。

在乐成浅层碎石土滑坡的稳定性系数数值计算中, 为了保证计算精度, 又便于划分单元, 二维弹塑性接触有限元模型全部采用 6 节点三角形等参单元对滑体和滑床进行离散化, 滑面 (带) 采用接触单元模拟。在网格划分时, 对计算结果影响最大的区域采用了较高的网格密度, 在滑坡体外采用了相对较低的网格密度, 在计算最为关注的滑坡体和滑面 (带) 附近还进行了适当的网格加密, 以便保证计算的精度 (继续加密网格后, 折减系数  $F_s$  的变化值小于 0.001)。计算模型共划分为 2486 个单元。其中, 接触单元 165 个。具体的网格划分如图 2 所示。

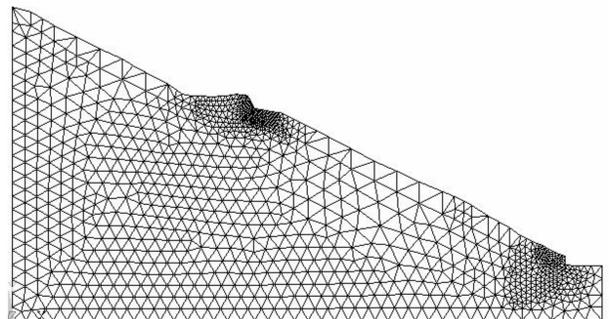


图 2 网格划分

Fig 2 Finite element mesh

在乐成浅层碎石土滑坡稳定性分析中, 运用大型有限元软件 ANSYS 进行滑坡弹塑性接触有限元

数值分析和计算, 滑体、滑面带及滑床的计算参数初始值 (天然状态) 均通过室内物理力学试验结合经验综

合确定, 详见表 1。

### 3 降雨作用下接触弹塑性有限元算法的构建

首先, 根据乐成滑坡区的资料, 对不同滑体和滑面岩土体的物理力学指标、不同滑体饱水面积比的 32 组滑坡稳定性系数  $K_p$  (采用不平衡条分法计算所得) 与滑体饱水面积比  $S_R$  的相关关系进行线性回归分析, 得到相应的回归方程式

$$K_p = 1.4938 - 0.55467S_R \tag{4}$$

式中:  $K_p$ — 滑坡稳定性系数;  $S_R$ — 滑体饱水面积比 (地下水水位线以下的滑体面积与滑体总面积之比); 相关系数  $R = 0.979$ 。

表 1 滑坡稳定性分析计算参数初始值

Table 1 Initial value of computation parameters for analysis of landslide stability

滑坡结构名称	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	粘聚力 $c / (\text{kPa})$
滑体	1835.7	38.83	0.3	26	16.5
滑面带	1820	5	0.35	21.95	16
滑床	2490	21163	0.21	28.6	500

查相关系数临界值  $r_\alpha$  表得  $r_{0.001} (32 - 2) = 0.55$  则因  $R > r_{0.001} (32 - 2)$ , 由此可知, 滑坡的稳定性系数  $K_p$  与滑体饱水面积比  $S_R$  相关关系极其密切和高度显著, 建立的回归方程式 (4) 有意义且具有实用价值。

由于乐成浅层碎石土滑坡是在强台风暴雨期间发生的。由此可知, 该滑坡发生解体破坏时滑体的饱水面积比较大。而由式 (4) 可知,  $S_R = 1$  时对应的滑坡稳定性系数  $K_p = 0.939$ 。这说明在强降雨作用下乐成浅层碎石土边坡已处于解体破坏状态, 这与实际情况基本相符 (长时间天晴时, 该斜坡未发现滑动迹象, 稳定性较好; 强降雨时, 该边坡处于明显滑动解体破坏状态)。

其次, 通过逐步减小滑坡体及滑面接触单元的抗剪强度, 反复对浅层碎石土边坡进行分析, 首先部分单元开始屈服, 应力在单元之间重新分配, 边坡中岩土体局部失稳逐渐发展, 直到某一个临界状态, 在虚拟的折减强度下整个边坡发生失稳滑动。那么, 在发生整体失稳之前的那个折减后的强度, 就是边坡处于极限破坏状态下滑坡体及滑面接触单元的等效抗剪强度。这种边坡稳定性分析方法称为浅层碎石土滑坡弹塑性接触有限元折减法。

采用浅层碎石土滑坡弹塑性接触有限元折减法, 分析乐成浅层碎石土边坡处于天然状态 (滑体饱水面积比  $S_R = 0$ ) 时滑坡的稳定性, 求得边坡的稳定性系数  $K_z = F_S = 1.419$ 。

第三, 假设在有地下水作用和无地下水作用时, 采用不平衡推力和二维不分离弹塑性接触有限元算法计算所得的边坡稳定性系数成正比关系, 即  $K_p / K_z = 1.4938 / 1.419 = 1.0527$ 。则式 (4) 可变换为

$$K_z = 1.419 - 0.5269S_R \tag{5}$$

由式 (5) 可知, 当  $K_z = 1$  时,  $S_R = 0.7952$  当  $S_R = 1$  时,  $K_z = 0.8921$ 。

由以上分析可知, 在无地下水作用下乐成浅层碎石土边坡稳定性较好, 在强降雨作用下乐成浅层碎石土边坡已处于解体破坏状态, 这与实际情况相符。

第四, 比较采用不平衡推力和二维不分离弹塑性接触有限元算法计算所得的滑坡稳定性系数可知, 两者的绝对误差为 0.0748 两者的相对误差等于 5.27%。因此, 采用不平衡推力和二维不分离弹塑性接触有限元算法计算浅层碎石土边坡稳定性系数均能得到较符合实际的结果。但是, 采用不平衡推力法无法准确分析该类型滑坡在降雨作用下的变形解体破坏过程。而采用不分离接触弹塑性有限元算法可以从应力、应变、滑动状态以及滑动位移等方面获得滑坡解体变形破坏过程的信息, 能够从力学方面揭示滑坡的解体破坏机理。

最后, 结合式 (5), 进一步分析可知, 乐成浅层滑坡在没有受到降雨作用时, 其稳定性系数  $K_z = 1.419 > 1.0$  即滑坡体处于稳定状态, 具有较多的安全储备。但是, 当该滑坡在强降雨作用下, 滑体饱水面积比  $S_R$  将不断增大, 滑坡体及滑面带等效抗剪强度将不断降低, 下滑力不断增大, 而当滑体饱水面积比  $S_R = 0.7952$

时, 斜坡处于极限变形解体破坏状态。由此可见, 浅层碎石土边坡在强降雨作用时, 滑体内地下水来不及排泄引起地下水位急剧上升, 从而使得滑坡体及滑面等效抗剪强度急剧降低, 边坡稳定性系数骤然下降, 最终将导致斜坡失稳滑动。因此, 强降雨是诱发浅层碎石土边坡失稳滑动的最关键因素。

综上所述可知, 采用不分离接触弹塑性有限元算法计算所得的边坡稳定性系数  $K_s$  和滑体饱水面积比  $S_R$  的相关关系式 (5) 能够可靠分析降雨作用下浅层碎石土滑坡变形解体破坏过程, 为该类型滑坡的预测预报提供科学依据。

### 4 滑坡解体变形破坏过程分析

采用降雨作用下弹塑性有限元接触算法分析浅层碎石土边坡稳定性, 可以直观、可靠地了解斜坡在不同饱水状态下的应力、应变、位移和滑坡体滑动状态的变化, 同时通过对这些变化的分析, 可以获得浅层碎石土滑坡在不同饱水状态下变形解体破坏机理的信息。

#### 4.1 不同饱水状态下滑体塑性应变的变化

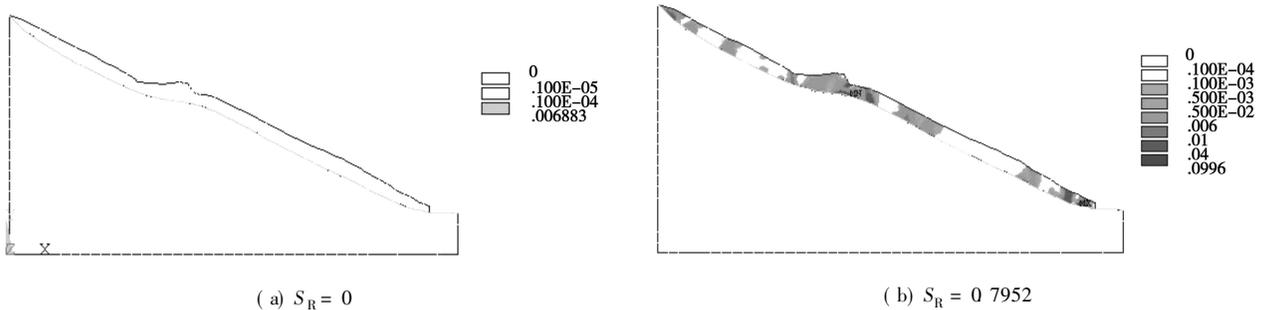


图 3 滑体塑性应变图

Fig 3 Contour diagram of slip-mass's plastic strain

图 3 (a), (b) 分别是滑体饱水面积比  $S_R = 0$  (天然状态) 和  $S_R = 0.7952$  (极限破坏状态) 对应的滑坡体塑性应变等值线图。比较图 3 (a), (b) 可知, 当滑坡体处于天然状态时, 滑体塑性应变很小 (不明显), 最大值约为 0.0069, 而随着降雨不断入渗, 滑体饱水面积比不断增大, 滑体中逐渐断续出现塑性应变。在滑体饱水面积比  $S_R = 0.7952$  时, 滑坡体处于极限破坏状态, 此时滑体塑性应变较大值为 0.01~0.0996, 分布在坡脚附近、滑体中部和滑体后缘, 滑体塑性应变最大值为 0.0996, 因此, 在滑坡变形破坏过程中滑体的塑性应变并不一致, 这将导致滑坡解体破坏。

#### 4.2 不同饱水状态下滑体位移的变化

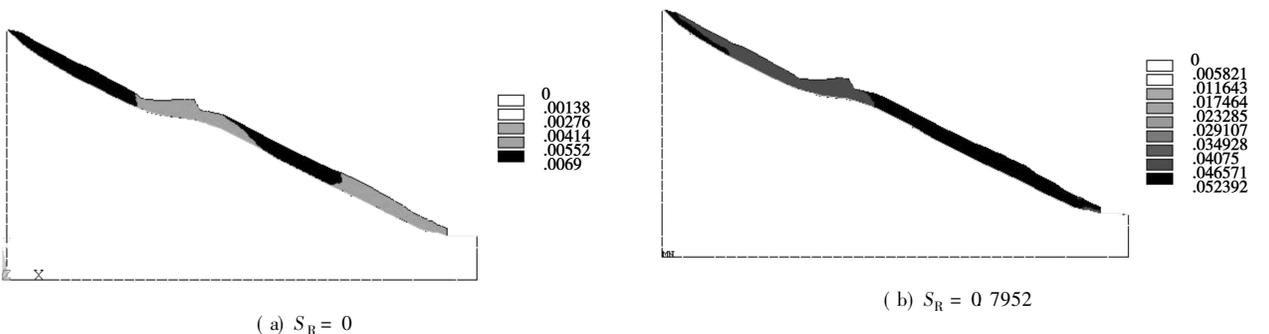


图 4 滑体位移等值线图 (单位: m)

Fig 4 Contour diagram of slip-mass's displacement

图 4 是滑体饱水面积比  $S_R = 0$  (天然状态) 和  $S_R = 0.7952$  (极限破坏状态) 对应的滑坡体位移等值线图。由图 4 (a) 可知, 当滑体饱水面积比  $S_R = 0$  即滑坡处于天然状态时, 滑体的位移大小呈现不均匀分布, 滑体位移最大值为 0.69 m, 滑体位移较大值约为 0.55~0.69 m, 大约位于滑体后四分之一和中前部四分

之一。由图 4(b)可知,当滑体饱水面积比  $S_R = 0.7952$  即滑坡处于极限破坏状态时,滑体的位移大小也呈现不均匀分布,滑体位移较大值为  $4.66 \sim 5.24 \text{ cm}$ ,位于滑体的前半部和后缘靠滑面的局部地段,其最大值约为  $5.24 \text{ cm}$ 。

综上所述可知,当浅层碎石土滑坡处于天然状态和极限破坏状态时,滑体的位移大小呈现不均匀分布。在滑坡的变形破坏发展过程中,滑体位移的变化幅度也不一致,这将容易导致滑坡的解体破坏。

### 4.3 不同饱水状态下滑体沿滑面滑动状态的变化

图 5(a), (b)分别是滑体饱水面积比  $S_R = 0$ (天然状态)和  $S_R = 0.7952$ (极限破坏状态)对应的滑体沿滑面滑动状态等值线图。图例中数值为 1 表示滑体与滑床之间呈张开状态,数值为 2 表示滑体处于滑动状态,数值 = 3 表示滑体与滑床之间呈粘合状态。

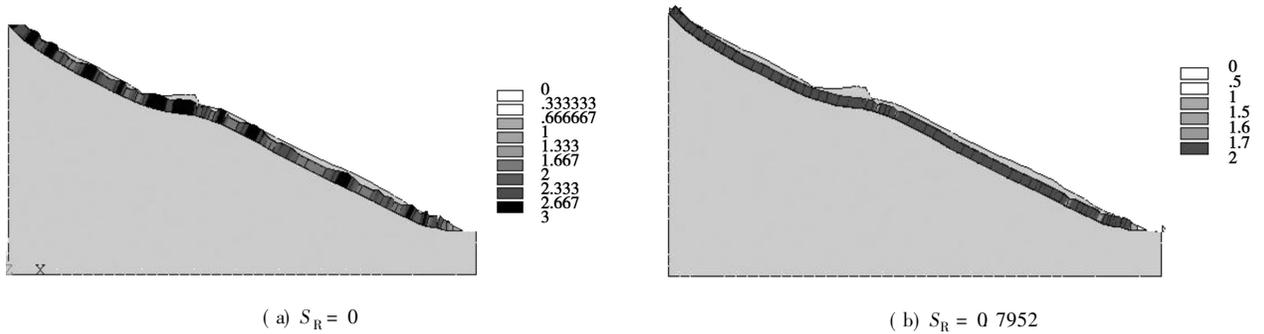


图 5 滑体位移等值线图(单位: m)

Fig 5 Contour diagram of slip mass's sliding state along sliding plane

由图 5(a)可知,当滑体饱水面积比  $S_R = 0$  即滑坡处于天然状态时,滑坡中滑体沿滑面滑动状态是极不一致的,有的处于滑动状态,有的处于粘合稳定状态。由图 5(b)可知,当滑体饱水面积比  $S_R = 0.7952$  即滑坡处于极限破坏状态时,滑体沿滑面滑动状态也在滑面形状转折处及坡脚附近呈现稍微不一致,但总体上沿滑面滑体已处于滑动状态。由此可知,在天然状态下,由于浅层碎石土滑坡滑体沿滑面滑动状态的不一致,容易引起滑体变形解体,产生拉张裂缝和微裂隙,有利于降雨下渗。随着降雨的不断入渗,滑体饱水面积比不断增大,滑体下滑力将不断增大,滑面岩土体的抗剪强度将不断降低,滑坡稳定性系数和滑坡体的稳定性将随之不断下降,滑坡中滑体沿滑面滑动状态由稳定粘合状态不断向滑动解体破坏状态发展,最终将导致滑坡解体破坏。

### 4.4 不同饱水状态对应的滑动面接触摩擦应力的变化

图 6(a), (b)分别是滑体饱水面积比  $S_R = 0$ (天然状态)和  $S_R = 0.7952$ (极限破坏状态)对应的滑动面接触摩擦应力等值线图。

由图 6(a)可知,当滑体饱水面积比  $S_R = 0$  即滑坡处于天然状态时,最大滑动面接触摩擦应力位于滑面的中部稍偏上的转折处,其最大值为  $9552 \text{ Pa}$  滑动面接触摩擦应力大多数在  $3184 \sim 9552 \text{ Pa}$ 之间,且在整个滑面上滑动面接触摩擦应力分布极不均匀,但在坡脚处滑动面接触摩擦应力很小接近零且滑面后部滑动面接触摩擦应力也较小。由图 6(b)可知,当滑体饱水面积比  $S_R = 0.7952$  即滑坡处于极限破坏状态时,接触摩擦应力大小沿滑面分布极不均匀,最大滑动面接触摩擦应力沿滑面断续分布,其最大值为  $11936 \text{ Pa}$  但部分地段滑动面接触摩擦应力比天然状态下的接触摩擦应力小的多,已由峰值强度逐渐衰减,说明在极限破坏状态下该部分滑坡体已发生解体破坏。

从以上分析可知,在滑坡变形解体破坏过程中,滑动面上接触摩擦应力的发挥程度是不一致的。

## 5 降雨作用下浅层碎石土滑坡解体变形破坏的机理

我国南方地区,雨水充沛,在长期的降雨作用下,碎石土边坡中一般都形成了管网状排泄系统。但是,由于风化作用强烈和降雨的作用,浅表地层土体中粉粒、粘粒为主的细粒土含量较高,所以虽然浅层碎石土边坡中存在管网状排泄系统,但是其渗透系数一般都较低。

由于我国南方地区, 雨水充沛, 植被一般都较发育, 所以浅层碎石土滑坡的滑动带(面)岩土体的饱和度都较高, 如经钻探原状土取样分析表明, 天然状态下乐成浅层碎石土滑坡的滑动带(面)岩土体的饱和度约为 90% ~ 100% (共取 5 个土样), 均值为 95.6%。由此可知, 降雨对浅层碎石土滑坡的滑动带(面)岩土体的内摩擦角和凝聚力一般不会产生显著影响。由于碎石土的抗剪强度不但取决于内摩擦角和凝聚力的大小, 而且由内摩擦角决定的抗剪强度还随滑面上法向应力的增加而增加。因此, 在我国南方地区, 降雨对浅层碎石土滑坡的作用主要是通过增加滑坡体的孔隙水压力, 使滑体的下滑力增大以及使作用在滑面上的法向应力减小从而降低滑面带岩土体的等效抗剪强度, 最终促使浅层碎石土边坡发生滑动而形成滑坡。

由于浅表层碎石土的饱和度较低, 孔隙中存在较多空气, 阻力较大, 而且由于浅表地层土体中粉粒、粘粒为主的细粒土含量较高, 土中具有较大的粘滞阻力。因此, 只有克服了孔隙中的空气阻力和土中的粘滞阻力, 才会发生渗透。由此可知, 由于一般强度的降雨能够提供足以克服孔隙中的空气阻力和土中的粘滞阻力的能力十分有限, 而且浅层碎石土滑坡区的地表水排水条件一般都相对较好(根据野外调查, 在“泰利”强台风暴雨作用下浙江省泰顺县境内发生的 45 个浅层碎石土滑坡的坡体两侧冲沟都相距较近, 而且坡前临空面都较宽阔), 所以一般强度降雨的雨水下渗能力较差。而强降雨作用能够提供足以克服孔隙中的空气阻力和土中的粘滞阻力, 易发生渗透, 从而使地下水位不断上升。因此, 一般只有在强降雨作用下, 才会发生浅层碎石土边坡滑动而形成滑坡。

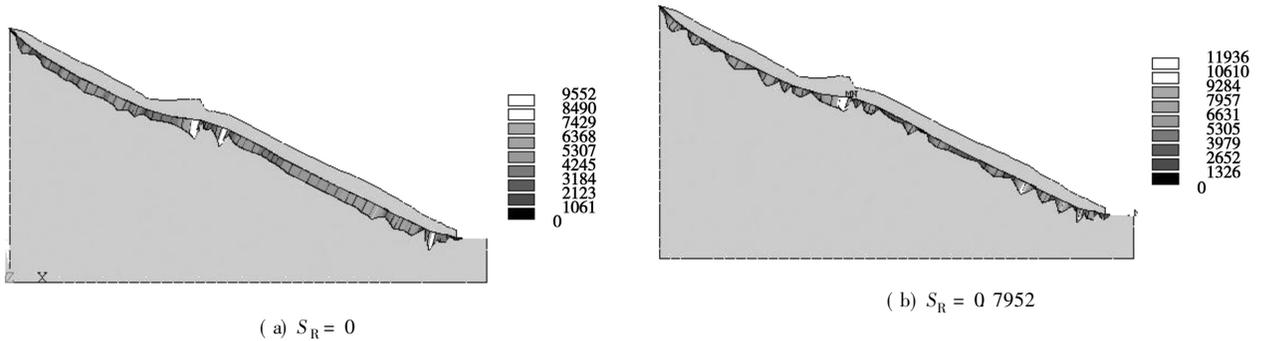


图 6 滑动面接触摩擦应力等值线图 (Pa)

Fig 6 Contour diagram of contact friction stress on sliding plane

当浅层碎石土滑坡处于天然状态时, 滑体后部位移值一般较大, 滑坡中滑坡体的水平位移、竖向位移、滑坡体沿滑面滑动位移和滑体沿滑面滑动状态都不一致, 容易引起滑体变形解体, 产生微裂隙和拉张裂缝, 有利于降雨入渗。在强降雨作用下, 雨水不断下渗, 当水力梯度达到一定数值时, 地下水开始通过滑体中管网状排泄系统向坡外排泄。当降雨强度加大、持续时间延长时, 滑体中地下水位不断上升, 而且碎石土中的粉粒、粘粒等为主的细粒土将在碎块砾石间移动, 同时在地下水渗流作用下易引起土体塌落, 发生局部坍塌, 从而导致细小的排泄管道发生堵塞或破坏, 使得地下水来不及排泄, 最终使得地下水位急剧上升。因此, 使得滑体饱水面积比急剧增大, 导致滑坡体中孔隙水压力急剧增大, 使得滑体的下滑力急剧增大以及使作用在滑面上的法向应力急剧减小, 因而使得滑面的等效内摩擦角急剧降低, 最终使得滑面带岩土体的等效抗剪强度急剧降低, 边坡稳定性系数和滑坡体的稳定性也将急剧降低, 滑坡中滑体沿滑面滑动状态由稳定粘附状态不断向滑动状态发展。当滑体饱水面积比达到一定数值(如乐成浅层碎石土滑坡滑体饱水面积比  $S_R = 0.7952$ ), 滑面带的等效摩擦系数降低到一定数值时, 浅层碎石土边坡将发生突然失稳解体破坏。

解体破坏后的边坡由于原有的地下水管网状排泄系统遭到严重破坏, 使得地下水位骤然上升和滑体饱水面积比骤然增大, 从而使得滑坡体中孔隙水压力骤然增大, 因而骤然增大了滑体的下滑力以及使得作用在滑面上的法向应力骤然减小, 使得滑面的等效内摩擦角骤然降低, 最终使得滑面的等效抗剪强度骤然降低, 加剧了边坡的解体破坏速度和破坏程度。同时, 在浅层碎石土滑坡变形破坏过程中, 由于滑体位移、滑体沿滑面位移、滑体沿滑面滑动状态、滑体塑性应变和滑面上接触摩擦应力等分布和变化存在较大差异性, 因此将导致滑坡发生不同程度和不同位置的解体破坏。这就是降雨作用下浅层碎石土滑坡变形解体破坏的主要机理。同时, 综合分析可知, 强降雨是浅层碎石土滑坡发生失稳的主要触发因素。

在乐成浅层碎石土滑坡变形解体破坏过程中, 沿滑面滑动位移较大值区域由滑面后部不断向前扩展, 最

终几乎分布在整个滑面上;滑体竖向位移也不断增加;滑体水平位移较大值区域不断向滑体的前半部迁移,而滑体后部的水平位移变化比滑体前半部分的水平位移变化小得多;边坡稳定性系数和滑坡体的稳定性将不断下降,滑坡中滑体沿滑面滑动状态由稳定粘合状态不断向滑动状态发展,最终将导致浅层滑坡的解体破坏。当滑坡体处于天然状态时,浅层碎石土滑坡稳定性较好,滑体塑性应变很小(不明显)。而随着降雨不断入渗,滑体由滑面附近向坡外逐渐断续出现塑性应变。在滑坡体处于极限破坏状态时,滑体塑性应变较大值区域出现在坡脚附近、滑体中部和滑体后缘。因此,随着降雨不断入渗,碎石土滑坡在滑动过程中滑体塑性应变并不一致,这容易导致滑坡的解体破坏。这是降雨作用下碎石土滑坡变形解体破坏机理的具体体现。

当浅层碎石土滑坡处于天然状态时,在整个滑面上滑动面接触法向应力分布极不均匀。随着降雨不断下渗,滑动面接触法向应力不断增大,滑坡逐渐变形解体破坏,解体破坏的坡体部位滑动面接触法向应力将不断减小。在浅层碎石土滑坡变形解体破坏过程中,滑动面上接触摩擦应力发挥的程度是不一致的。在无地下水作用的天然状态下,碎石土滑坡在整个滑面上滑动面接触摩擦应力都不一致。但随着降雨不断入渗,滑动面接触摩擦应力并不一定增大,浅层碎石土滑坡最大滑动面接触摩擦应力沿滑面呈断续分布,部分地段滑动面接触摩擦应力比天然状态下的接触摩擦应力小得多(说明该地段滑体已开始解体破坏),已由峰值强度逐渐衰减,部分原来滑动面接触摩擦应力较小的地方接触摩擦应力不断增大而在极限破坏状态下达到峰值强度。这是降雨作用下浅层碎石土滑坡变形解体破坏的一般力学机理的具体体现。

## 6 结 语

以浙江乐清市乐成浅层碎石土滑坡为例,通过现场勘探、测试及室内岩土物理力学指标试验,采用数理统计分析方法、不平衡推力法和不分离接触弹塑性有限元算法,以及运用碎石土边坡地下水管网状排泄系统的理论,对降雨作用下碎石土滑坡变形解体破坏机理进行分析,得到以下一些主要研究成果。

(1)建立二维不分离接触弹塑性有限元模型,采用数理统计分析方法、不平衡推力法和不分离接触弹塑性有限元强度折减法,以及运用碎石土边坡地下水管网状排泄系统的理论,揭示了强降雨作用下浅层碎石土滑坡变形解体破坏的主要机理和一般的力学机理。

(2)运用碎石土边坡地下水管网状排泄系统的理论,分析降雨对碎石土边坡变形解体破坏的作用机理,得出强降雨是浅层碎石土滑坡发生失稳的主要触发因素。

## 参考文献:

- [ 1 ] 王发读. 浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探 [ J ]. 水文地质工程地质, 1995, 1: 20- 23.
- [ 2 ] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究 [ J ]. 灾害学, 2001, 16(2): 87- 92
- [ 3 ] 张季如. 边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21( 6): 843- 847
- [ 4 ] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23( 19): 3381- 3388
- [ 5 ] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用 [ J ]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23( 3): 1- 8
- [ 6 ] 毛坚强. 接触问题的一种有限元解法及其在岩土工程中的应用 [ J ]. 土木工程学报, 2004, 37( 4): 70- 75
- [ 7 ] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22( 2): 254- 260.
- [ 8 ] Ugai K. A method of calculation of total safety factor of slopes by elastoplastic FEM [ J ]. Soils and Foundations, 1989, 29( 2): 190- 195
- [ 9 ] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究 [ J ]. 水利学报, 2003, 34( 1): 21- 26
- [ 10 ] 马建勋, 赖志生, 蔡庆娥, 等. 基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23( 16): 2690- 2693