

# 强降雨条件下浙江武义平头村山体高边坡 稳定性分析

吴李泉<sup>1</sup>, 张 锋<sup>2</sup>, 凌贤长<sup>2</sup>, 朱占元<sup>2,3</sup>, 王立娜<sup>2</sup>, 高 霞<sup>2</sup>

(1. 浙江科技学院 建筑工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 哈尔滨工业大学 路基与防护工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150090;  
3. 四川农业大学 信息与工程技术学院, 四川 都江堰 625014)

**摘要:** 基于饱和-非饱和渗流理论, 综合考虑降雨入渗引起土体重量增加、渗透力增大以及抗剪强度降低等因素的影响, 建立降雨条件下边坡稳定性分析有限元数值模拟模型, 并开发出相应的计算程序 USLOPE-FEM。以浙江武义平头村山体高边坡为例, 研究强降雨入渗条件下边坡的瞬态渗流场与稳定性, 根据获得任意时刻各节点的压力水头、应力和位移等, 并分析强降雨中边坡的稳定性。研究结果表明, 未降雨时, 该边坡基本处于稳定状态; 连续强降雨 24 h, 坡体浅层含水量显著增加, 表层出现饱和区且零压面逐渐向内部推移, 从而诱发局部滑塌, 与实际发生的局部滑塌部位一致, 由此验证了有限元分析模型和计算程序的可靠性。上述研究结果为强降雨条件下边坡稳定性分析与安全性评价提供了一般的思路和技术参考经验, 也为该边坡的失稳预警与滑坡防治准备了必要的基础资料。

**关键词:** 边坡工程; 强降雨; 高边坡; 稳定性分析; 饱和-非饱和渗流

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)06-1193-07

## STABILITY ANALYSIS OF HIGH SLOPE SUBJECTED TO HEAVY RAINFALL IN PINGTOU VILLAGE OF WUYI COUNTY, ZHEJIANG PROVINCE

WU Liquan<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>, LING Xianzhang<sup>2</sup>, ZHU Zhanyuan<sup>2,3</sup>, WANG Lina<sup>2</sup>, GAO Xia<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Institute of Subgrade and Prevention Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China; 3. College of Information and Engineering Technology, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** Based on the theorem of saturated-unsaturated infiltration, the numerical model of slope stability subjected to rainfall is developed; and the codes named USLOPE-FEM are programmed to consider the influence of increase of gravity and infiltration forces and the decrease of shear strength. Taking a high slope in Pingtou Village of Wuyi County in Zhejiang Province for example, the transient seepage and stability of this slope subjected to heavy rainfall infiltration are simulated; and the slope stability is quantitatively evaluated according to the transient pore water pressure, the stress and displacement. Numerical results show that the slope is stable in normal conditions; but after the heavy rainfall (magnitude of 20 mm/h) for 24 h, the increase of water content and the moving of zero pressure surface into slope will result in local collapsing. The results are in good agreement with the actual collapse, which verifies the reliability and rationality of the numerical model and program USLOPE-FEM. All above-achieved results are acceptable for evaluating the stability of slope subjected to heavy rainfall; and a general technique idea and references for slope treatment are also provided.

**Key words:** slope engineering; heavy rainfall; high slope; stability analysis; saturated-unsaturated infiltration

**收稿日期:** 2009-02-18; **修回日期:** 2009-03-09

**基金项目:** 浙江省科技支撑与引导计划项目(2008C23019)

**作者简介:** 吴李泉(1966-), 男, 博士, 1988年毕业于长春地质学院矿产勘查专业, 现任副教授, 主要从事环境岩土工程和地质构造方面的教学与研究工作。E-mail: wuliquan1966@163.com

# 1 引言

连续降雨是诱发边坡失稳的重要因素之一，特别是近年来频繁出现的特大暴雨、强台风等极端天气而诱发的各种滑坡灾害，这也促使降雨条件下边坡稳定性分析与安全性评价日益成为国内外岩土工程与防灾减灾工程研究热点<sup>[1-17]</sup>。为了深入探究降雨诱发边坡失稳的机制和规律，A. Tohari 等<sup>[18, 19]</sup>连续进行了降雨入渗模型和原位试验研究；基于 Mohr-Coulomb 准则和有效应力原理，D. G. Fredlund 等<sup>[20-22]</sup>提出并发展了一些非饱和土强度准则，促进了非饱和土土力学的快速发展；此外，在数值模拟方面，基于饱和 - 非饱和渗流理论<sup>[23]</sup>，采用极限平衡法和强度折减有限元法评价降雨入渗条件下边坡稳定性。然而，强降雨入渗条件下饱和 - 非饱和边坡失稳原因及其复杂，如何综合考虑多种因素的联合作用，特别是土体质量增加和强度参数软化对边坡稳定性的影响是本文的研究重点。

鉴于此，基于饱和 - 非饱和降雨入渗理论，本文综合考虑降雨入渗引起渗透力增大、土体的重度增加和强度软化等因素的影响；采用弹塑性有限元分析原理，建立降雨入渗条件下饱和 - 非饱和土边坡的数值模型且开发相应的计算程序，并以浙江武义平头村山体高边坡为例，进行强降雨条件下边坡稳定性分析，以验证所建立的数值模型和自编程序的可靠性，为强降雨条件下边坡稳定性分析与安全性评价提供了一般的思路、经验参考，也为边坡的失稳预警与滑坡防治准备了必要的基础资料。

## 2 强降雨条件下非饱和土边坡稳定性分析模型

### 2.1 饱和 - 非饱和渗流控制方程

基于质量守恒原理和非饱和土 Darcy 定律，各向异性多孔介质的饱和 - 非饱和渗流控制微分方程<sup>[23]</sup>可写为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] + S = [C(h) + \beta S_s] \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中： $h$  为压力水头(饱和区为正值，非饱和区为负值)； $k_r(h)$  为相对渗透系数，且  $0 \leq k_r(h) \leq 1$ ； $k_{ij}$  为饱和渗透系数； $S_s$  为单位贮水系数； $C(h)$  为容水度，

且  $C(h) = d\theta/dh$ ， $\theta$  为体积含水量； $\beta$  为特征系数(非饱和区为 0，饱和区为 1)； $t$  为时间； $S$  为源汇项。

式(1)的定解条件为：

(1) 初始条件：

$$h(x_i, t)|_{t=0} = h_0(x_i) \quad (2)$$

(2) 边界条件：

$$\left. \begin{aligned} h(x_i, t)|_{\Gamma_1} &= h_0(x_i, t) \\ - \left[ k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] n_i \Big|_{\Gamma_2} &= q_n \\ - \left[ k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] n_i \Big|_{\Gamma_3} &= 0 \quad (h|_{\Gamma_3} = 0) \\ - \left[ k_r(h) k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h) \right] n_i \Big|_{\Gamma_4} &= q_n \quad (h|_{\Gamma_4} < 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为方向余弦； $\Gamma_1$  为水头边界； $\Gamma_2$  为流量边界； $\Gamma_3$  为饱和逸出边界； $\Gamma_4$  为非饱和逸出边界； $q_n$  为边界面法向流量，向外为正。

对式(3)采用伽辽金加权余量法求解，并在空间上采用有限单元法进行离散，时域上采用隐式向后差分格式进行离散。

### 2.2 降雨入渗边界

降雨条件下，雨水的入渗量与土体的渗透性、干湿度及降雨强度、降雨持时等因素有关。可采用 Darcy 定律计算垂直地表的最大入渗能力：

$$R(t) = - \left( k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i + k_{i3} \right) n_i \quad (4)$$

设  $q(t)$  为降雨强度  $Q(t)$  在入渗面上的分量，且有  $q(t) = Q(t) n_i$ 。当  $q(t) \leq R(t)$  时，此时全部入渗，即  $R(t)|_{\Gamma_5} = q(t)$ ；当  $q(t) > R(t)$  时，坡面形成定水头饱和入渗，即  $h(x_i, t)|_{\Gamma_1} = z(x_i)$ 。

### 2.3 水力渗透参数

与饱和土不同，非饱和土的水力渗透参数为压力水头(基质吸力，体积含水量或饱和度)的函数，可由土水特征曲线得出。常用的拟合模型很多，本文采用 Van Genuchten 模型(即 VG 模型)<sup>[23]</sup>拟合水力渗透参数：

$$S_e = [1 + (\alpha h)^\beta]^{-m} \quad (5)$$

$$k_r(\theta) = S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{-m})^m]^2 \quad (6)$$

式中:  $S_e$  为饱和度;  $n$  为孔隙率;  $\alpha$ ,  $m$  均为模型的拟合参数, 且  $m = 1 - \beta^{-1}$ 。

### 2.4 土的重力增量离散

随着降雨持续的时间增加, 边坡的土体含水量也将随之增大, 土的重度增加使得其下滑力增大。降雨入渗后土的重度为  $\gamma = \gamma_d + S_e(\gamma_s - \gamma_d)$ 。将由降雨入渗引起的土的附加重力增量等效为节点荷载, 即

$$\{\Delta R_s\}^e = \iiint [N]^T \{\Delta P\} dx dy dz \quad (7)$$

式中:  $\{\Delta R_s\}^e$  为降雨入渗附加重力体积力的等效节点荷载,  $[N]$  为形函数,  $\{\Delta P\}$  为土的重力增量。

### 2.5 渗透力增量离散

基于不同降雨时刻的坡体渗流场, 对饱和区根据增量有限元理论计算的由单元渗透体积力增量等效的节点渗透载荷, 即

$$\{\Delta F_s\}^e = -\gamma_w \iiint [N]^T \{\Delta J\} dx dy dz \quad (8)$$

式中:  $\{\Delta F_s\}^e$  为渗透体积力引起的等效节点荷载,  $\gamma_w$  为水的重度,  $\{\Delta J\}$  为增加的水力梯度。

### 2.6 改进的抗剪强度准则

自 20 世纪 60 年代以来, 国内外很多学者, 如 Bishop 等基于 Mohr-Coulomb 准则提出了非饱和土的强度表达式<sup>[20~22]</sup>, 其中以 Fredlund 的双参数模型在岩土工程界一度获得广泛认可。本文基于固结不排水静三轴试验资料, 采用土的强度参数与含

水量之间函数关系, 考虑含水量对非饱和土强度的影响:

$$\tau = c(w) + \sigma \tan \varphi(w) \quad (9)$$

式中:  $\tau$  为总的剪应力;  $c(w)$ ,  $\varphi(w)$  分别为黏聚力和内摩擦角, 均为与含水量相关的函数。

式(9)为总应力强度公式。此外, 根据土的弹-塑性模型和相关联的流动法则, 计算因降雨引起的坡体各时段的应力、位移以及塑性应变。基于上述理论, 采用 Visual Fortran 语言编写了降雨条件下饱和-非饱和土坡稳定性分析计算程序 USLOPE-FEM, 并实现降雨入渗条件下边坡渗流场与瞬态稳定性的数值模拟。

## 3 平头村山体高边坡稳定性分析

### 3.1 工程地质条件与滑坡概况

平头村山体高边坡(高度 55 m)位于浙江省武义县王宅镇平头村西山坡(见图 1)。坡体上覆地层为第四系耕土层、粉质黏土夹碎石, 厚度不均, 最薄处 2~3 m, 土层松散且有较多滑动裂隙, 地表水易下渗; 下伏地层为白垩系风化凝灰质、泥质粉砂岩, 较密实且相对隔水。该区域降雨量丰富, 年平均降雨量达 1 060 mm, 历史最大降雨强度为 65.9 mm/h。地下水位较浅, 坡体下部常年处于渗水状态。2000 年 6 月中、下旬, 武义县连降暴雨, 1 h 最大降雨



图 1 平头村山体高边坡灾害现状

Fig.1 Disaster overview of high slope in Pingtou Village

量 25.3 mm, 24 h 最大降雨量 98.0 mm。6 月 26 日, 平头村西山坡出现地裂缝、涌水洞、局部滑塌现象, 见图 1。临近的民房、墙体局部受损; 上覆土体沿下伏基岩面滑动, 滑坡体似马蹄形, 滑动方向 NE90°, 其前缘宽 130 m、轴线长 120 m、厚度 2~3 m、土方量超过  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 后缘、周界地裂缝明显, 内部地裂缝、陡坎、台阶较多。若连续大暴雨, 极有可能出现大规模滑坡, 坡体前缘住户将遭到毁灭性灾害, 因而倍受当地政府、民众关注, 开展强降雨条件下边坡稳定性评价势在必行。

### 3.2 计算模型与计算参数

平头村山体高边坡强降雨条件下稳定性分析的计算模型见图 2, 横向长 187 m、左侧高 25 m、右侧高 97 m。基于实际情况, 设定坡面 DEF 为饱和逸出边界, 上坡面 FG 为降雨入渗边界, 基岩露头 GH 为不透水边界, HI, IA, AB 均为不透水边界, BC 为非饱和逸出边界(8 m 深的排水沟)。采用等参四边形单元剖分计算域见图 3, 左、右竖向边界为水平位移约束, 底部水平边界为竖向位移约束, 共

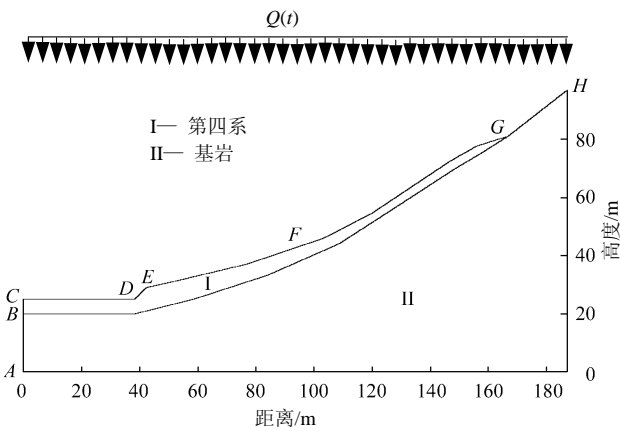


图 2 计算模型  
Fig.2 Calculation model

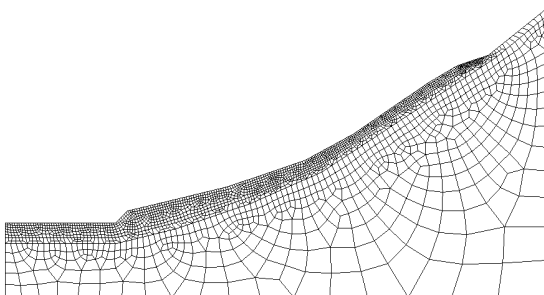


图 3 计算域单元网格剖分  
Fig.3 Element meshes of local region for calculation

2 512 个节点, 2 348 个单元。采用弹塑性本构模型, 并基于 Mohr-Coulomb 屈服准则, 计算任坡体内所有节点应力、位移和单元塑性应变。计算参数见表 1。根据 2000 年 6 月中、下旬武义县连降暴雨的平均降雨强度 20 mm/h, 计算等强型降雨持续 24 h 的边坡瞬态渗流场, 据此对边坡可进行各个时刻的稳定性评价。

表 1 计算参数  
Table 1 Calculation parameters

岩土体名称	饱和渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$	孔隙率	VG 模型参数	
			$\alpha$	$\beta$
土体	$5.78 \times 10^{-4}$	0.45	2.02	1.60
基岩	$1.21 \times 10^{-7}$	0.30	2.00	1.50

岩土体名称	干重度 $/(kN \cdot m^{-3})$	饱和重度 $/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 $/kPa$	泊松比
土体	12.30	22.77	$2.0 \times 10^2$	0.35
基岩	19.80	25.00	$3.0 \times 10^6$	0.30

### 3.3 计算结果分析

#### 3.3.1 降雨入渗分析

基于勘察资料<sup>[24]</sup>, 图 2 计算模型的右侧、左侧初始定水头边界分别为 57.3, 17.0 m, 据此对边坡强降雨入渗条件下饱和 - 非饱和和稳定渗流进行模拟计算。降雨初始时刻的压力水头等值线分布见图 4; 降雨 24 h 的压力水头等值线分布见图 5。可看出, 降雨入渗 24 h, 边坡上部土层含水量增加, 负压区消失, 出现较浅的饱和区; 并且, 因下伏基岩的隔水作用, 土层零压面与基岩面之间的水头压力梯度很大。由于下坡面为饱和逸出边界, 因而地下水位升高不明显。

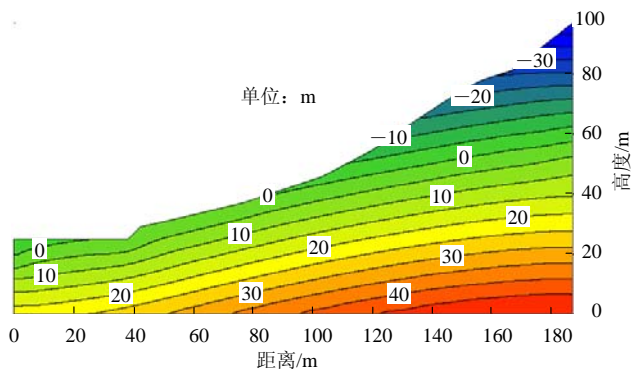


图 4 初始时刻压力水头等值线分布  
Fig.4 Distribution of water pressure in initial time

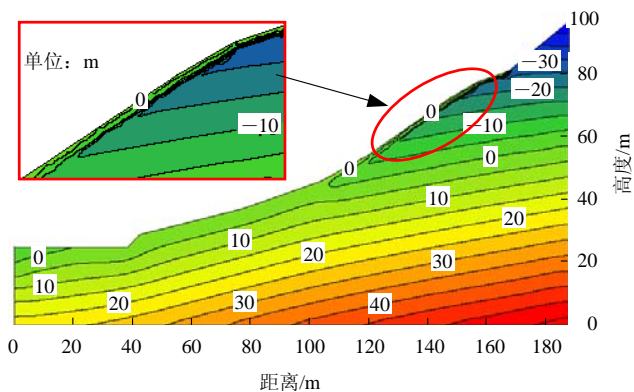


图 5 降雨 24 h 的压力水头等值线分布

Fig.5 Distribution of water pressure isolines after rainfall for 24 h

### 3.3.2 边坡稳定性分析

基于固结不排水静三轴试验资料, 并参考有关研究结果<sup>[22]</sup>, 该边坡覆土的含水量与抗剪强度指标之间关系, 即

$$\left. \begin{aligned} c &= 12.0 - 7.5w \\ \varphi &= 22.0 - 8.0w \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $w$  为质量含水量。

据此计算边坡强降雨入渗条件下的应力状态。降雨初始时刻的最大剪应力云图见图 6, 降雨 24 h 的最大剪应力云图见图 7。可以看出, 坡体中最大剪应力成层分布, 并随深度增加而增大; 与降雨前

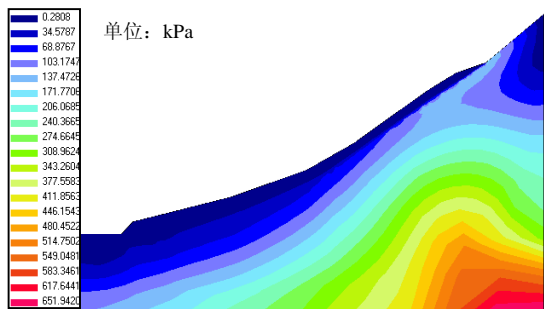


图 6 初始时刻最大剪应力( $\tau_{\max}$ )云图

Fig.6 Nephogram of the maximum shear stress  $\tau_{\max}$  of initial time

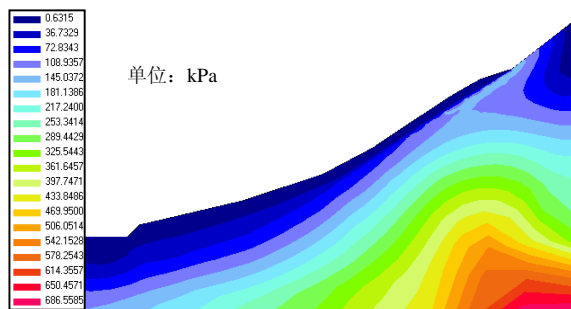


图 7 降雨 24 h 最大剪应力( $\tau_{\max}$ )云图

Fig.7 Nephogram of the maximum shear stress  $\tau_{\max}$  after rainfall for 24 h

相比, 降雨入渗后, 坡体中最大剪应力整体增大。

降雨初始时刻的塑性应变云图如图 8 所示, 降雨 24 h 的塑性应变云图见图 9。可以看出, 未降雨之前, 塑性应变主要集中分布于坡体下部覆土 - 基岩分界面, 主要是由于坡体下部处于饱和区的原因; 降雨入渗 24 h 后, 上部坡体的重力和下部坡体的渗透力均显著增大, 致使坡体沿覆土 - 基岩分界面的下滑力增加, 塑性应变区沿覆土 - 基岩分界面向坡顶扩展而逐渐贯通, 在边坡的坡脚和中部形成多处滑塌。图 10 为降雨入渗 24 h 的边坡土体位移矢量图, 可见, 降雨触发坡体位移, 特别是边坡中、上部有向下滑动的趋势。

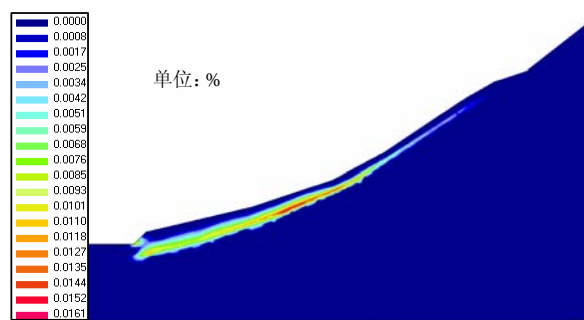


图 8 初始时刻塑性应变( $\epsilon^p$ )云图

Fig.8 Nephogram of plastic strain  $\epsilon^p$  of initial time

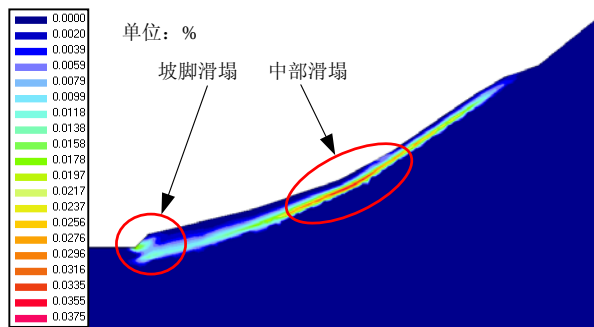


图 9 降雨 24 h 塑性应变( $\epsilon^p$ )云图

Fig.9 Nephogram of plastic strain  $\epsilon^p$  after rainfall for 24 h

数值模拟结果表明, 降雨强度为 20 mm/h 降雨入渗 24 h 后, 平头村西山坡的坡体前缘(坡脚)和中部将出现滑塌破坏。这一计算结果与 2000 年 6 月 26 日实际发生的滑坡现象相当吻合, 从而很好验证了本文提出的降雨条件下边坡稳定性分析模型和相应的有限元计算程序的可靠性, 可以用于降雨条件下边坡稳定性评价、失稳预警与滑坡防治的模拟计算分析。

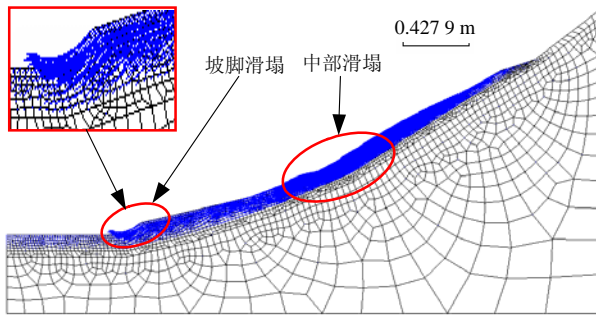


图 10 降雨 24 h 位移矢量图

Fig.10 Vectors of displacements after rainfall for 24 h

## 4 结 论

(1) 基于饱和 - 非饱和降雨入渗理论, 综合考虑降雨入渗引起渗透力增大、土的重度增加和强度软化等因素的影响, 建立了降雨入渗条件下饱和 - 非饱和土边坡稳定性分析的数值模型并开发了相应的有限元计算程序。通过浙江武义平头村山体高边坡强降雨条件下稳定性分析的实例模拟计算, 很好再现了强降雨触发滑坡的实际现象, 从而验证了所建立的数值模型与开发的计算程序的可靠性。

(2) 强降雨入渗为诱发浙江武义平头村山体高边坡失稳的主要原因。未降雨之前, 坡体塑性区较小且处于基本稳定状态。强降雨过程中, 因降雨入渗使得边坡上部土层含水量增加, 负压区消失(基质吸力降低)且出现饱和区, 土层零压面与基岩面之间的水头压力梯度很大; 并且随着降雨时间延长, 坡体表层便形成暂态饱和区且逐渐向内部推移, 土体的重量和渗透力显著增大、抗剪强度明显降低, 坡体中剪应力整体增大且沿覆土 - 基岩分界面的下滑力明显增加, 塑性应变区沿覆土 - 基岩分界面向坡顶扩展而逐渐贯通, 在 24 h 后, 在坡脚和中部形成多处滑塌。

本文的研究为进一步开展强降雨条件下边坡稳定性分析与安全性评价提供了一般的思路、经验参考, 也为平头村山体高边坡强降雨条件下的失稳预警与滑坡防治准备了必要的基础资料。

**致谢** 本文的研究工作得到了浙江省地质环境监测总站赵健康和赵健明高级工程师、浙江省气候中心徐集云高级工程师以及浙江省武义县国土资源局倪坚高级工程师的热情支持与帮助, 在此表示衷心感谢!

## 参考文献(References):

- [1] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1 066 - 1 073.(ZHOU Jiawen, XU Weiya, DENG Junye, et al. Stability analysis of slope under the condition of rainfall infiltration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1 066 - 1 073.(in Chinese))
- [2] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 704 - 711.(RONG Guan, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. Stability analysis of Yuanmo highway slope under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 704 - 711.(in Chinese))
- [3] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 109 - 113.(XU Jiancong, SHANG Yuequan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 109 - 113.(in Chinese))
- [4] 娄一青. 降雨条件下边坡渗流及稳定性有限元分析[J]. 水利学报, 2007, 38(增): 346 - 351.(LOU Yiqing. Finite element analysis of slope seepage and stability due to rainfall infiltration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Supp.): 346 - 351.(in Chinese))
- [5] 魏宁, 茜平一, 傅旭东. 降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 778 - 782.(WEI Ning, QIAN Pingyi, FU Xudong. Effects of rainfall infiltration and evaporation on soil slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 778 - 782.(in Chinese))
- [6] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(2): 69 - 78.
- [7] KIMA J, JEONG S, PARK S, et al. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils[J]. Engineering Geology, 2004, 75(3/4): 251 - 262.
- [8] CHO S E, LEE S R. Evaluation of surgical stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9): 756 - 763.
- [9] SCHMERTMANN J H. Estimating slope stability reduction due to rain infiltration mounding[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9): 1 219 - 1 228.
- [10] CHEN H, LEE C F, LAW K T. Causative mechanisms of

- rainfall-induced fill slope failures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(6): 593 - 602.
- [11] ALANE P, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(5): 443 - 450.
- [12] ZHAN T L T, NG C W W. Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, 4(4): 273 - 284.
- [13] GAVIN K, XUE J F. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(2): 223 - 230.
- [14] NG C W W, SHI Q. Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 22(1): 1 - 28.
- [15] 李兆平, 张 弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5): 57 - 61.(LI Zhaoping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(5): 57 - 61.(in Chinese))
- [16] 黄茂松, 贾苍琴. 考虑非饱和和非稳定渗流的土坡稳定分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(2): 202 - 206.(HUANG Maosong, JIA Cangqin. Stability analysis of soil slopes subjected to unsaturated transient seepage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 202 - 206.(in Chinese))
- [17] 徐 晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1 957 - 1 962.(XU Han, ZHU Yiwen, CAI Yuanqi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1 957 - 1 962.(in Chinese))
- [18] TOHARI A, NISHIGAKI M, KOMATSU M. Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(5): 575 - 587.
- [19] ZHANG J, JIAO J J, YANG J. In-situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China[J]. *Engineering Geology*, 2000, 57(1/2): 31 - 38.
- [20] FREDLUND D G, RAHARDIO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(FREDLUND D G, RAHARDIO H. *Soil mechanics for unsaturated soil*[M]. Translated by CHEN Zhongyi. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [21] 黄润秋, 吴礼舟. 基于一种新强度理论的非饱和土边坡稳定性分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(1): 57 - 60.(HUANG Runqiu, WU Lizhou. Study on shear strength of the unsaturated soil and slope stability analysis[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology)*, 2008, 35(1): 57 - 60.(in Chinese))
- [22] 凌 华, 殷宗泽, 蔡正银. 非饱和土的应力 - 含水量 - 应变关系试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 651 - 655.(LING Hua, YIN Zongze, CAI Zhengyin. Experimental study on stress-water content-strain relationship of unsaturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 651 - 655.(in Chinese))
- [23] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻, 等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.(MAO Changxi, DUAN Xiangbao, LI Zuyi, et al. *Numerical computer in seepage flow and program application*[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1999.(in Chinese))
- [24] 浙江省第三地质大队. 浙江省武义县王宅镇平头村滑坡地质调查报告[R]. 杭州: 浙江省第三地质大队, 2000.(The 3rd Geology Group in Zhejiang Province. *Geology investigation report of landslide in Pingtou village of Wuyi County, Zhejiang Province*[R]. Hangzhou: The 3rd Geology Group in Zhejiang Province, 2000.(in Chinese))