

滇西典型土质滑坡饱和-非饱和渗流稳定性研究

周志超¹, 李向全¹, 蒋良文², 侯新伟¹, 刘玲霞¹

摘 要: 降雨是滇西土质滑坡灾害的主要诱发因素,而滑坡土体中孔隙水压力的存在使得岩土体的力学性状变得更加复杂.选择滇西红层典型土质滑坡-思铺滑坡做深入的调查,考虑降雨入渗的影响,基于饱和-非饱和渗流理论,选择 9 月份的降雨量监测资料,对强降雨条件下思铺滑坡地下水动态渗流场进行了数值模拟,将其孔隙水压力结果用于滑坡稳定性分析.同时,又基于非饱和土强度理论,采用 GLE 通用条分法,对滑坡稳定性的时空效应进行了评价,从而得出降雨入渗与土质滑坡的内在联系:滑坡稳定性与其渗流滞后性有较好的对应关系,最危险滑动面随含水量不同而呈空间的演变.

关键词: 降雨入渗;土质滑坡;数值模拟;饱和-非饱和渗流

中图分类号: P642.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9102(2010)01-0055-07

降雨是滑坡的重要诱发因素之一,有“无水”不滑坡之说.近年来,伴随着大规模的工程建设,人类活动对自然界与气候的影响更为明显.暴雨等极端气候诱发地质灾害也日趋频繁,促使降雨诱发地质灾害的机制与规律的研究日益成为国内外滑坡地质灾害研究的热点^[1-2].土质滑坡往往容易在强降雨的诱发作用下发生,要准确评价土质滑坡的稳定性,坡体渗流场的计算就显得尤为重要.对该问题的研究,包含了对降雨条件下边坡饱和-非饱和渗流场的研究^[3-6]以及将渗流场的变化纳入到边坡稳定的研究等方面,使得饱和-非饱和土体渗流对边坡稳定性影响的研究越来越受到重视.吴宏伟等^[7]通过对香港地区的非饱和土斜坡的稳定性研究,认为基质吸力的变化是土坡失稳的重要因素.郭抗美,王超^[8]等在对甘肃某黄土滑坡现场勘察、确定利用遗传算法反演边坡稳定分析的重要参数-降雨入渗深度的基础上,结合数值分析软件 FLAC 和 FLAC/SLOPE 对该滑坡进行了详细分析,结果表明遗传算法反演岩土力学参数是可行的;该滑坡滑动时的降雨入渗深度为 5.3 m.朱文彬等^[9]采用有限

元对降雨条件下土体滑坡进行了数值分析,将 Duncan-Chang 模型引入了饱和-非饱和土的本构关系模型,建立了饱和-非饱和土统一的非线性弹性模型.目前饱和-非饱和渗流与非饱和土力学在降雨诱发滑坡中的研究已经形成了一些理论,取得了一定的成果.但是由于力学参数和渗透系数的各向异性,岩土本构关系上复杂的非线性等原因,使得许多研究领域还有待进一步探索和研究,近年来非饱和问题也逐渐成为土质滑坡研究的热点性问题.

我国的中南、西南部分地区广泛分布着膨胀土与残积土等黏性土,其所发育的滑坡常常容易在强降雨作用下诱发.受特殊的地形地貌、地质构造和水文气象条件的影响,地处西南边陲的云南滇西地区红层土质分布广泛,降雨诱发滑坡地质灾害最为典型.而滇西地区地处云南西部,是国家西部大开发重点地区,也是我国通向东南亚的大动脉所在.同时,也是我国著名的地质灾害高危多发区.因此,深入研究降雨入渗对滇西典型土质滑坡的诱发机制与规律对该地区的滑坡灾害的预测和防治具有重要的指导意义.

1 典型滑坡概况

1.1 地形地貌

思铺滑坡(见图 1)位于滇西地区永平县辖区内,大瑞铁路线路从滑坡前缘通过.属低中山地貌,地形起伏相对较小,地面高程 1 760~1 800 m,相对高差约 40 m,坡度较缓.该滑坡地貌特征较为明显,轴向长约 123 m,最大宽度 100 m,滑坡体平均厚约 12 m,最大总体积约 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$.滑坡体上植被不发育,滑体中后缘地表见多条横向裂缝.

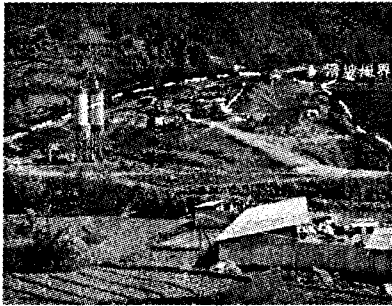


图 1 思铺滑坡全貌
Fig.1 Panorama of Sipu slope

1.2 地层岩性

思铺滑坡地表覆盖第四系全新统滑坡堆积粉质黏土,冲洪积粉质黏土、卵石土、粗圆砾土;下伏基岩为白垩系下统景星组下段砂岩夹泥岩.

由于其特殊的岩土结构:上层粉质黏土厚 10~30 m.该黏性土一般具有半成岩,弱胶结的特点,但遇水尤其是扰动后遇水会快速软化并伴有弱膨胀,黏性较强,失水后易开裂,自由膨胀率 40%,属弱膨胀土.

黏土其下伏为卵石土与粗圆砾土,透水性较强,汇水能力强,为上层黏土提供了易滑条件.

下伏基岩为灰绿、黄绿夹紫红色砂岩夹泥岩,其中,以砂岩为主,泥岩为紫红色.砂岩中~细粒结构,泥、钙质胶结,中厚层~厚层状,差异风化显著,埋藏较深,力学强度相对较好,其岩土地质结构见图 2.

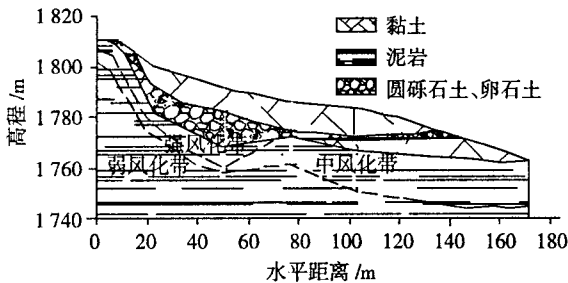


图 2 主滑面剖面示意图
Fig.2 Profile of major slipping plane

滑坡为土质滑坡,岩土倾向与滑坡主滑方向接近,且上层黏土与卵石土和粗圆砾土交界面形成坡度较陡的弧面,其地质构造特征为滑坡提供了切割条件,为该滑坡主要影响因素之一.

1.3 水文气象

滑坡所在区域属亚热带季风气候,年平均气温 15.8℃,年平均日照 2 053.7 h,有霜期 115 d,年平均降水量 1 092.1 mm.干湿季节分明,雨季为 5 月到 10 月份,该时段降雨量占全年的 85%~95%,也是地质灾害的高发期.

该滑坡地下水以第四系孔隙潜水和基岩裂隙水为主,土层孔隙潜水卵石土层中含量较丰富,黏性土层中含量甚微;砂岩、泥岩中存在一定量的基岩裂隙水,含量不大,地下水水位埋藏较深.

据各阶段在附近取地表水及地下水分析,地下水属 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型水等,卵石土土层中地下水含量较丰富,且容易从坡顶得到降雨补给.尤其在旱季过后强降雨作用下,表层裂隙导致地下水沿卵石土快速入渗,受上层弱透水的黏性土影响,将在坡脚处形成汇水区,对滑坡体的稳定性造成不利影响.

2 土质滑坡饱和和非饱和渗流分析

由于思铺滑坡的地下水位埋藏相对较深,当连续降雨后,非饱和区土壤水运动和饱和区地下水运动相互关联,此时需要将两者统一起来研究,即为饱和-非饱和渗流问题.

2.1 基本方程

在饱和-非饱和渗流分析中,定解条件方程表达式(1)~式(5)为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \rho g m_2 \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (1)$$

$$h(x, y, t) = H_l(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_1. \quad (2)$$

$$k_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(\bar{n}, x) + k_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(\bar{n}, y) = q_n(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_2. \quad (3)$$

$$h(x, y, t) = z(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_3. \quad (4)$$

$$h(x, y, t_0) = H_0(x, y, t_0). \quad (5)$$

式中, h 为水头, k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向的渗透系数, ρ 为水的密度, m_2 为储水曲线斜率, Γ_1 为水头分布规律已知的边界, H_l 为边界水头,称为第一类边界条件; Γ_2 为流量已知的边界, q_n 为边界法向流量, $\cos(\bar{n},$

α)、 $\cos(\bar{n}, y)$ 为边界外法线方向的方向余弦,称为第二类边界条件; Γ_3 为渗出面边界, z 为渗出面节点坐标,可归为第三类边界条件; H_0 为初始时刻的水头值,称为初始条件。

2.2 边界条件

鉴于该地区的滑坡往往发生在雨季,降雨为主要诱发因素.地下水补给类型主要为降雨补给,为全面分析该滑坡的自然状态下稳定特性,采用2008年降雨量最大的9月份作为极端降雨条件下的渗流边界条件(见图3).在距河道较近的坡脚处由于地下水位埋深仅1 m左右,因此将其作为定水头边界.左侧由于其侧向径流量小,底部的渗透性特别小,都作零通量边界处理。

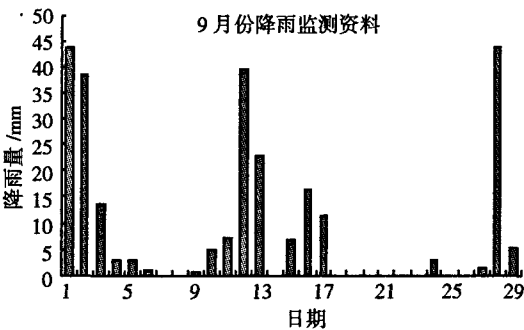


图3 9月份日降雨量分布图
Fig.3 Daily rainfall date of the September

2.3 渗透函数与土体参数

地下水的渗流计算中重要的水文地质参数是渗透系数,对特定的饱和土来说,通常取为常数.而对于非饱和土的渗透系数是变量,同时受到土的孔隙比和饱和度变化的影响.由于非饱和土的孔隙比变化可能很小,它对渗透系数的影响在问题简化的情形下是可以忽略不计的,而对饱和度变化的影响则是主要因素.因此,非饱和土渗透系数常常表示为土体饱和度或基质吸力的函数.采用Fred Lund提出的函数进行计算:

$$K_w=K_s \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\Theta(e^i)-\Theta(\psi)}{e^i} \Theta'(e_i^i)}{\sum_{i=1}^N \frac{\Theta(e^i)-\Theta_s}{e^i} \Theta'(e_i^i)} \tag{6}$$

其中:

$$\Theta'=C(\psi) \frac{\Theta_s}{\{\ln[e+(\frac{\psi}{a})^n]\}^m}; C(\psi)=1-\frac{\ln(1+\frac{\psi}{C_r})}{\ln(1+\frac{10^6}{C_r})}$$

式中, K_w 为测量饱和渗透系数,针对特别的体积水含

量或负孔隙水压力计算的渗透系数(m/s); θ_s 体积含水量; e 为常数 2.718 28; y 代表负孔隙水压力对数的虚变量; ψ 是和间隔*i*有关的基质吸力; α 为近似的土体中空气进入值; n 控制体积水函数变形点的参数; m 是和残积水含量相关的参数; C_r 是残积水含量和基质吸力相关的常数.本文土的力学参数与饱和渗透系数通过实验室获取,而非饱和带渗透函数主要通过颗粒分实验数据与饱和渗透系数近似拟合而获得。

土体的基本参数通过室内试验得到,其参数如表 1.

表 1 模型参数表
Tab.1 Parameter for model

岩土材料	天然重度 / (kN/m³)	天然含水 量 /%	凝聚力 /kPa	天然内摩 擦角 / (°)	饱和渗透 系数 /(m/s)
粉质黏土	19.6	29.0	20.37	10.6	1.62e-008
卵石土	21.0	22.0	13.2	35	1.24e-003
泥岩	20.0	12.9	22	45	1.60e-010

2.4 土质滑坡暂态非饱和渗流分析

降雨特征及其对渗透性的影响直接关系到滑坡体的稳定性,对于非饱和和非稳定渗流在不同的降雨特征条件下,其瞬态流场分布不同.所以,降雨特征对非饱和和土质滑坡入渗影响无疑会起到非常重要的作用。

第一次强降雨后流场与孔隙水压力分布如图 4 和图 5 所示:由于第一次强降雨为连续的两次大雨和一次中雨,降雨量特别集中,导致滑坡体内水位迅速抬升,尤其在卵砾石层中,由于其渗透性较大,其上覆的黏土层相对渗透性小.在强降雨条件下,起到了一定的隔水顶板的作用,使得卵砾石层中的地下水具有承压性。

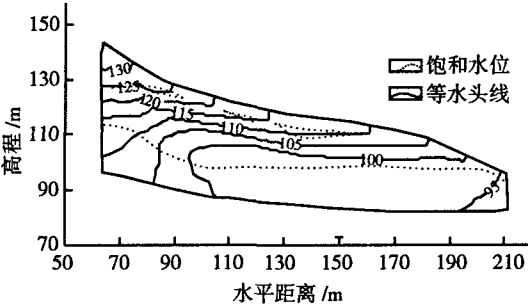


图 4 第一次强降雨后流场分布图
Fig.4 Seepage field after the first strong rainfall

经过第一次强降雨后,弱透水的黏土层经过长时间的渗透,表层黏土裂隙此时相对少了,大大降低了降雨入渗量.连续一次大雨和一次中雨,这第二次强降雨使得坡体内出现暂态饱和区(见图 6 和图 7).由于前期的降雨使得土壤含水量增大,坡体下部土壤容易达到饱和,水位得以抬升。

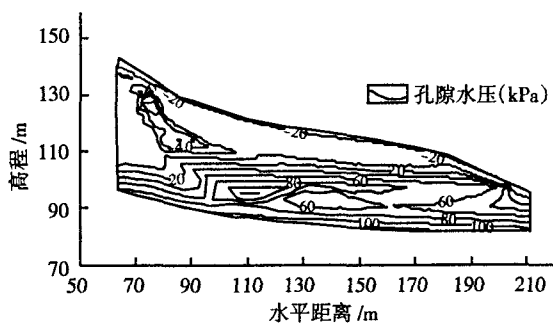


图 5 第一次强降雨后孔隙水压力分布(单位:kPa)

Fig.5 Pore-water pressure after the first strong rainfall

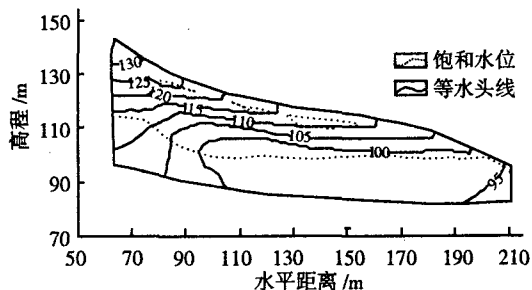


图 6 第二次强降雨后流场分布

Fig.6 Seepage field after the second strong rainfall

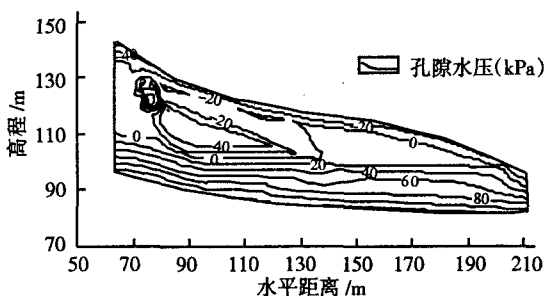


图 7 第二次强降雨后孔隙水压力分布

Fig.7 Pore-water pressure after the second strong rainfall

由于表层渗透性的减弱和第二次强降雨强度的减少,降雨使得表层实际入渗量减少,因此卵石层地下水中无承压性,可见前期降雨特征直接影响着滑坡体内渗流特征。

第三次强降雨为连续两次中雨,降雨过后滑坡体内流场似乎受影响不大(见图 8 和图 9),滑坡体依然有部分暂态饱和区,滑坡体下部地下水位下降后形成一较大的暂态饱和区,地下水位相对稳定。

第四次强降雨为一次强降雨,同样对流场的影响不大(见图 10 和图 11)。

3 降雨入渗影响下的非饱和土质滑坡稳定性分析

降雨入渗对滑坡的影响表现在孔隙水压力是暂态分布的,浸润面的位置随时间会发生变化,使得土

壤中体积含水量发生变化。含水量的增加会使土壤软化,抗剪强度降低,从而影响滑坡的稳定性。因此,本次通过渗流模拟计算降雨入渗在滑坡体内暂态孔隙水压力与土壤含水量的变化,从而结合 GLE 通用条分法分析,建立起定量的分析模型系统。

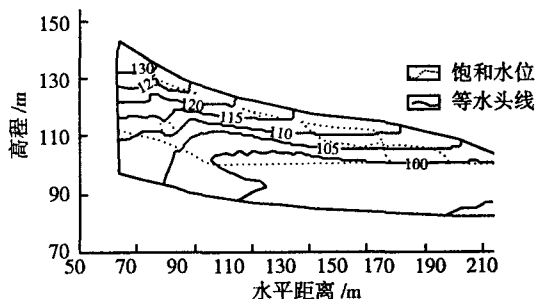


图 8 第三次强降雨后流场分布

Fig.8 Seepage field after the third strong rainfall

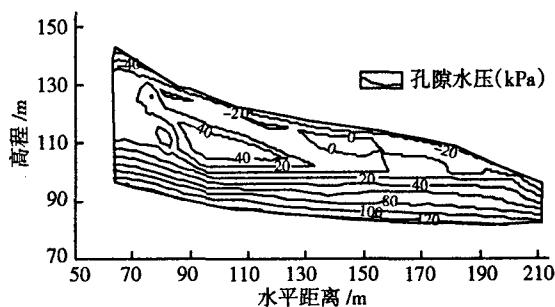


图 9 第三次强降雨后孔隙水压力分布

Fig.9 Pore-water pressure after the third strong rainfall

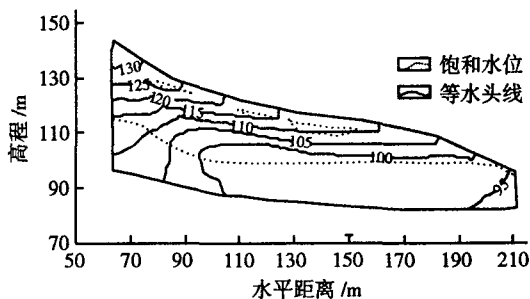


图 10 第四次强降雨后流场分布

Fig.10 Seepage field after the fourth strong rainfall

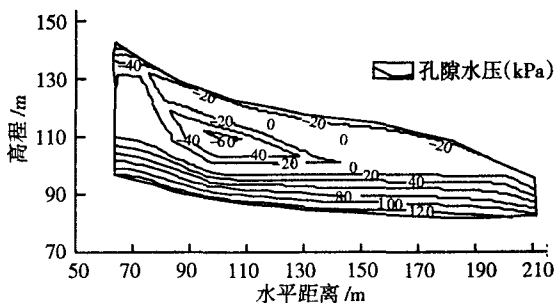


图 11 第四次强降雨后孔隙水压力分布

Fig.11 Pore-water pressure after the fourth strong rainfall

3.1 非饱和土强度

土的强度不仅与土的结构、应力路径、密度和土的矿物组成有关,还与土的体积含水率或重力含水率或土的饱和度密切相关.以往对滑坡的稳定性分析,常常采用有效应力抗剪强度参数,而忽略地下水位以上的负孔隙水压力的影响,这对滑动面主要处于水位以下的情况较为合理.但是当针对地下水位埋藏较深等情况时,就需要考虑非饱和的特殊情况,此时就不能在忽略负孔隙水压力的影响因素了.非饱和土抗剪强度研究至今,许多学者提出了非饱和土抗剪强度理论,Fred Lund 的线性非饱和土剪切强度理论被广泛接受,即:

$$\tau_f=c'+(\sigma-u_a)\tan\varphi'+(u_a-u_w)\tan\varphi^b. \tag{7}$$

其中: u_a ,孔隙气压力; u_w ,孔隙水压力; $\sigma-u_a$,破坏时,破坏面上的法向应力状态; u_a-u_w ,破坏时,破坏面上的基质吸力; φ^b ,抗剪强度随基质吸力 u_a-u_w 而增加的速率.

3.2 降雨诱发滑坡稳定性分析

思铺滑坡位于滇西地区,干湿季节分明,雨季降雨量大.因此,降雨往往是诱发滑坡的主导因子,在实测最大降雨量 9 月份降雨资料的基础上,通过对地下水暂态饱和-非饱和渗流数值模拟分析,结合 GLE 通用条分法分析了最大降雨量月份中降雨特征对滑坡稳定性的影响.

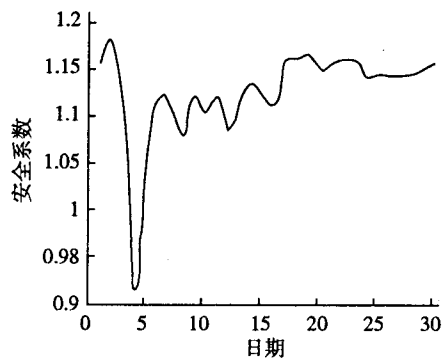


图 12 九月份安全系数时变曲线
Fig.12 Graph of safe factor in September

从图 12 可以看出,思铺滑坡的稳定性影响受第一次强降雨的影响最大.在第一次强降雨过后,即第 4 日的时候滑坡稳定性最小,安全系数低于 1.0,处于非稳定状态.安全系数的变化具有滞后性,在第一次强降雨中的连续 2 d 大雨过后的一天安全系数达到最低值,此后的 2 d 稳定性迅速增高.可能是由于卵石土层中具承压性的地下水释出,地下水对滑坡体的浮托作用逐渐减弱,滑坡稳定性回升.但仍然低于降雨前的稳

定性,是由于滑坡体中的含水量增高,基质吸力的作用弱化所致.

降雨量对该滑坡体的影响并不成对应的关系,只有第一次最大的强降雨对滑坡的稳定性响应较为敏感,而后的降雨对滑坡的影响就很小,这说明该滑坡受降雨特征的影响最大.在第一次降雨前由于土壤表层存在裂隙等因素,渗透性较好,在强降雨的作用下,雨水入渗量较大,从而对滑坡稳定性影响大.而后由于表层渗透系数降低,同时降雨强度远低于第一次降雨量.第一次强降雨持续时间和强度大,在表层土饱和后,由于降雨量远大于入渗量,表层易形成薄层水膜,极大地增加了降雨入渗量.该月的下旬降雨量很少,滑坡的稳定性逐渐回升到雨前状态,但仍然低于降雨前的稳定性,这与跟粘性土的释水慢有关.

3.3 滑坡最危险滑动面时空变化特征

由于岩土体本身的空间变异性,降雨入渗引起滑坡体内体积含水量时空分布不均,会直接影响到滑坡体内的渗透特性,含水量的分布导致基质吸力也呈现时空变化特性,从而在滑坡的最危险滑动面也会出现相应的时空演化特征.

从图 13 的滑坡体最危险滑动面空间演化图中,可以看出前两种最危险滑面出现在坡顶,这是由滑坡体的坡度与岩土体构造特性直接相关.由于卵石土的内摩擦角大于黏土,在坡顶的岩层面上角度较陡,容易形成结构性滑面.因此,在降雨前和降雨过后一段时间为最危险滑动面,表现出与降雨无明显的影响关系.

但是,第二种滑面出现在降雨过后,而且坡顶卵砾石层中存在暂态饱和区的情况下,饱和状态下卵砾石层的抗剪强度降低以及本身重度的增加有关.

第三种滑面出现在第一次强降雨后,即本月的 4 日、5 日,同时也是连续两天大雨过后出现.这种滑面形式的出现表现出滑坡体的非稳定状态,说明在干湿交替且连续强降雨时,最易诱发该滑坡,且滑体的体积大.因此,在滇西地区,对这种坡度相对平缓,有卵砾石夹层存在的典型黏性土质边坡,在旱雨季节更替,降雨量集中的时候,需特别注意防范此类滑坡灾害.

第四种滑面出现在强降雨后相当长一段时间.这是由于坡脚处于汇水区,在降雨过后一段时间仍然有来自坡体的地下水补给.土体中的含水量较高,土体抗剪强度降低,导致稳定性相对较低,直到降雨一段时间后地下水渗流减弱.土体的水软化作用也相应减弱,而后最危险滑面变为第一种类型.

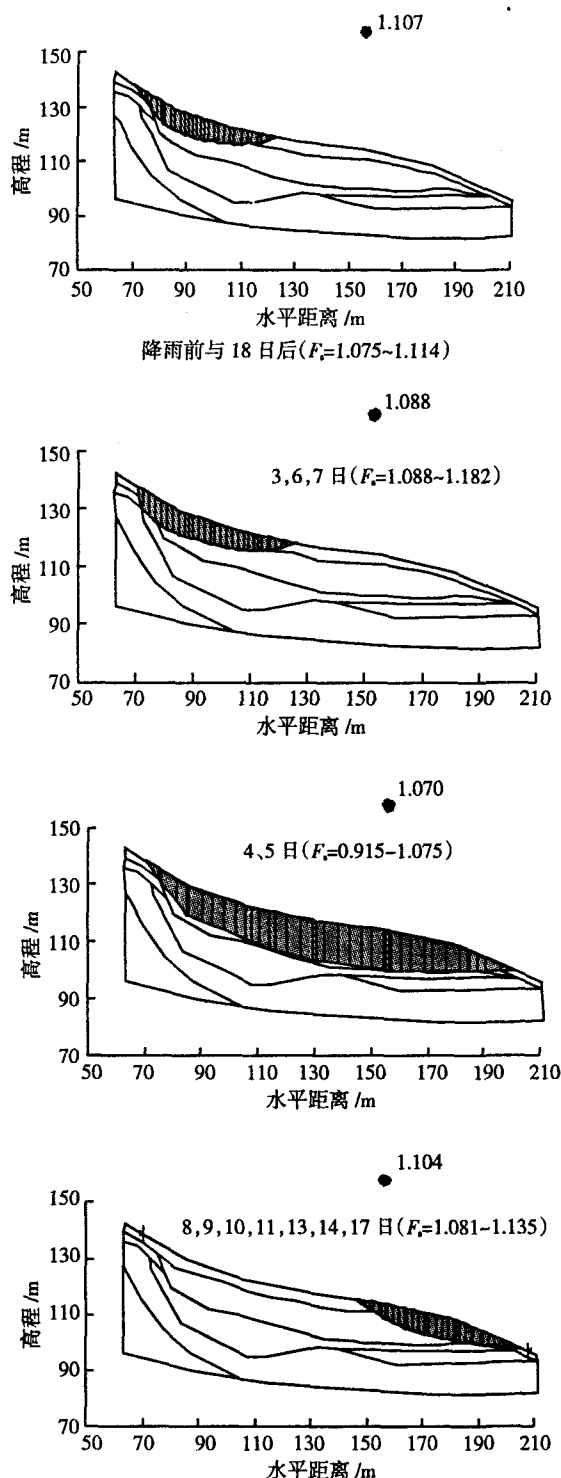


图13 滑坡最危险滑动面空间演化图

Fig.13 Evolutional map of the most dangerous slide face

4 结论

通过对思铺滑坡强降雨条件下的渗流场的数值模拟与稳定性分析,得到如下结论:

1)滇西红层区黏土与卵砾石层互层结构在强降雨条件下,黏土层起到了一定的隔水顶板的作用,使

得卵砾石层中的地下水具有承压性,产生的浮托作用不利于滑坡的稳定.

2)思铺滑坡在连续的强降雨作用下,流场特征与降雨峰值并不严格对应,其响应滞后于降雨特征.首次强降雨的渗流场变化最为明显,前期降雨特征直接影响着滑坡体内渗流特征.

3)降雨量对该滑坡体的影响并不成对应的关系,只有首次较大的强降雨对滑坡的稳定性响应较为敏感,而后的降雨对滑坡的影响就很小,说明该滑坡受降雨特征的影响最为明显.黏土层的渗流滞后时间约为2 d,滑坡体的稳定性也相应地出现滞后现象.因此,该地区强降雨后的时间段仍要对灾害滑体加强监测.

4)降雨入渗引起滑坡体内体积含水量时空分布不均,会直接影响到滑坡体内的渗透特性.含水量的分布导致基质吸力也呈现时空变化特性,从而在滑坡的最危险滑动面也会呈现出相应的时空演化特征.

参考文献:

- [1] Aleotti P.A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. *Engineering Geology*, 2004, 73(3-4): 247-265.
- [2] 张明,胡瑞林,谭儒蛟,等.降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J]. *工程勘察*, 2009, 37(03): 11-17.
Zhang M, Hu R L, Tan R J, et al. State-of-the-art study on landslides due to rainfall and the prospect[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(03): 11-17.
- [3] Cardinal M, Galli M, Guzzetti F, et al. Rainfall induced landslides in December 2004 in South-western Umbria Central Italy[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006, 2(6): 237-260.
- [4] Shakoor A, Smithmyer A J. An analysis of storm-induced landslides in colluvial soils overlying mudrock sequences, southeastern Ohio, USA[J]. *Engineering Geology* 2005, 78(3-4): 257-274.
- [5] Shimadake K, Fujii H, Nishimura S, et al. The stability of unsaturated slopes considering changes of matric suction[C]//*Proc ISTICUS Paris: International Academic Publishers*, 1995, I: 293-299.
- [6] 张培文,刘德富,黄达海,等.饱和-非饱和和非稳定渗流的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2003, 24(6): 927-931.
Zhang P W, Liu D F, Huang D H, et al. Saturated-unsaturated unsteady seepage flow numerical simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(6): 927-931.
- [7] 吴宏伟,陈守义,庞宇威.雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. *岩土力学*, 1999, 20(1): 65-69.
Wu H W, Chen S Y, Pang Y W. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 65-69.
- [8] 郭抗美,王超,纪洪广.基于降雨入渗深度反演的某黄土滑坡机理研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 24(3): 56-60.

Guo K M, Wang C, Ji H G. Analysis of loess landslide mechanism based on depth identification of rainfall infiltration. Journal of Hunan University of Science&Technology (Natural Science Edition), 2009, 24 (3):56-60

力学与工程学报, 2002, 21(4):509-512.

Zhu W B, Liu B C. Forming and development process of soil landslide during rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4):509-512.

[9] 朱文彬, 刘宝琛. 降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J]. 岩石

Stability analysis of typical soil slope based on saturated and unsaturated seepage in the west of Yunnan Province

ZHOU Zhi-chao¹, LI Xiang-quan¹, JIANG Liang-wen²,
HOU Xin-wei¹, LIU Ling-xia¹

(1. Institute of Hydrogeology & Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, China)

Abstract: Rainfall is the important factors that induce landslide hazard in the west of Yunnan province, in fact, it is very difficult to analyze the mechanical behaviors of soil because of the pore water pressure's existence. Based on the in-depth investigation, the typical soil slope which called Sipu slope in the west of Yunnan province was chosen. The saturated-unsaturated seepage theory was introduced; numerical simulation on groundwater seepage in Sipu slope under persistent rainfall condition was studied according to the monitoring daily rainfall date in September. The pore water pressure was used for landslide stability analysis, base on unsaturated soil strength theory. The slope stability of space-time effect was evaluated by limit equilibrium method (GLE). It revealed the inherent relation between rainfall infiltration and soil slope: the stability of landslide show certain correlation with the hysteresis on seepage, and the spatial variability of critical slip surface change with water content.

Key words: rainfall infiltration; oil slope; numerical simulation; saturated-unsaturated seepage