

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.14

天气因素对排土场生态边坡稳定性的影响

郑开欢, 罗周全, 江 宏

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为了研究排土场在天气影响下的稳定性, 建立排土场温度-渗流-应力耦合有限元分析模型, 研究其饱和-非饱和渗流场、应力场以及稳定性响应规律, 然后与排土场典型滑坡特征进行对比验证, 并提出采用边坡危险滑动带来分析非均质边坡失稳特征。结果表明: 考虑天气影响时, 雨水入渗深度范围土体孔隙水压力均会不同程度地低于无蒸散和植物截留时的孔隙水压力, 稳定性系数极小值比无蒸散和植物截留时更高, 出现时间更晚, 表明雨后一段时间内滑坡风险仍在不断增加, 能更准确地反映出降雨所致边坡失稳的滞后效应。提出在采用极限平衡法分析非均质边坡失稳特征时, 通过递增稳定性系数增量来观察最危险滑动带发展趋势的方法, 以便更加全面反映出边坡滑坡类型和特征。

关键词: 排土场; 蒸散; 冠层截留; 吸力; 稳定性分析; 危险滑动带

中图分类号: TU416

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)06-0097-06

Weather factors' influence on the stability of ecological slopes of waste dump

ZHENG Kaihuan, LUO Zhouquan, JIANG Hong

(Faculty of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In order to examine the weather effect on the stability of ecological slope of waste dump, a coupled thermo-hydro-mechanical numerical model of waste dump based on finite element method is established to analyze response pattern of seepage field, stress field and stability. Then analysis results are compared with the characteristics of typical landslide and critical slip zone is considered to better describe failure feature of non-homogeneous slope. The results show that when evapotranspiration and canopy interception are considered, pore-water pressure of soil affected by infiltration is lower and the minimum value of stability coefficient appears later with a higher value, which means slope failure risk can still increase within a period of time after rainfall. Hysteresis effect of slope failure is reflected more accurately compared with the results when evapotranspiration and canopy interception aren't considered. When limit equilibrium method is used in stability analysis of non-homogeneous slope, characteristics of slope failure can be reflected more entirely through watching the scope change of the critical slip zone due to increasing of stability coefficient increment.

Keywords: waste dump; evapotranspiration; canopy interception; suction; stability analysis; critical slip zone

0 引言

天气现象是指发生在大气中的各种自然现象, 其中太阳辐射、气温、湿度、风、云、雾、雨、雪、霜、雹等现象都能直接或间接对土体含水量产生影响。对于有植

被护坡的排土场生态边坡而言, 能够对边坡水分产生影响的直接途径是雨、雪、雹、蒸发、蒸腾和植物截留作用, 其中雨、雪、雹等降水作用会增加边坡水分, 蒸发、蒸腾和植物截留作用则相反。太阳辐射、气温、湿度、风等现象会对蒸发、蒸腾和植物截留产生影响, 进而间

收稿日期: 2017-12-08; 修订日期: 2018-01-18

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题资助项目(2017YFC0602901); 国家自然科学基金资助项目(51274250)

第一作者: 郑开欢(1983-), 男, 四川达州人, 博士研究生, 从事矿山安全研究工作。E-mail: 276774457@qq.com

通讯作者: 罗周全(1966-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 从事金属矿深井开采及灾害控制理论与技术研究。E-mail: lzq505@hotmail.com

接影响边坡土体含水量。蒸发、蒸腾持续消耗已经渗入土体的雨水,而植物截留则是在降雨期间拦截还未渗入土体的雨水,进而减少雨水入渗量,边坡土体含水量的变化会直接导致基质吸力发生改变,进而对稳定性产生影响。以前在分析排土场边坡稳定问题时,通常不考虑天气现象,主要是由于缺乏有效的分析手段和工具。然而,实践表明,大量滑坡事故的发生都是由于降水作用下土体基质吸力降低而导致的,这表明天气现象对边坡稳定性的影响是不容忽视的。随着计算机和数值仿真技术的发展,将天气现象纳入边坡稳定性分析中已经逐步成为现实,一些学者也已经对此进行了有益的探索。陈建斌等^[1]采用大气-非饱和土相互作用模型对控制非饱和土吸力和变形的大气蒸发和植物蒸腾等多参数进行了影响程度分析,发现在植被覆盖条件下,吸力变化主要取决于植物叶面积指数 LAI,而总腾发量的大小决定了地表变形量。桂勇等^[2]的研究发现冠层截留和蒸腾作用有利于边坡稳定,在强降雨条件下,不同边坡稳定性系数提高率相差不大。吴宏伟^[3]用人造根系统模拟植物蒸腾作用产生的负孔隙水压力,建立考虑人造根系统水文和力学效应的有限元模型,重点探讨了直根形、心形根、板形根 3 种不同形状根系的护坡效应。MARTIN 等^[4]基于综合循环模型的气候预测结果得到长期气候循环影响下的边坡地下水位变化规律,并根据获得的地下水数据建立粘塑性流变模型研究边坡位移速率响应规律,分析了温室效应导致的气候变化对未来滑坡位移的影响。JOCHEN 等^[5]基于环境模拟软件 PCRaster 的地理信息系统环境建立了一个考虑地下水位变化的边坡稳定性分析模型,对不同气候场景下德国波恩的三个山坡的稳定性进行了研究。上述研究主要针对长期气候变化对边坡的稳定性影响而展开,对于短期天气作用下的边坡稳定性变化规律有必要结合工程实例进一步开展深入研究。

本文以实例排土场为研究对象,通过天气影响下排土场温度-渗流-应力耦合分析,分析蒸发、蒸腾、植物截留作用下的边坡稳定性变化规律,并与不考虑上述作用时的边坡稳定性进行对比,全面分析气象因素对排土场稳定性的影响方式以及影响程度,同时与排土场实际观测情况进行对比验证。为了弥补由于极限平衡法不能考虑岩土体应力应变关系,在确定非均质边坡最危险滑动面时与实际情况存在出入的缺陷,提出采用危险滑动带来判断边坡失稳的整体范围和趋势,从而更加全面准确地反映非均质边坡的滑坡特征。

1 非饱和土的蒸发蒸腾理论

1.1 非饱和土的蒸发理论

当土表持续蒸发而水分供给有限时,土处于非饱和状态,其蒸发率是逐渐降低的^[6]。Wilson 以适用于饱和土的 Penman 蒸发公式为基础,通过考虑土表相对湿度变化,提出了计算非饱和土表面实际蒸发量的 Penman-Wilson 公式^[7]:

$$AE = \frac{\Gamma Q + vE_a}{\Gamma + vA} \quad (1)$$

式中:AE——实际蒸发率,单位 mm/d;

Γ ——饱和蒸气压随温度变化曲线的斜率,单位 kPa/°C;

Q ——地表净辐射,单位 mm/d。

v ——湿度常数;

E_a ——与风速、蒸气压、相对湿度有关的函数, $E_a = f(u)P_a(B-A)$;

$f(u)$ ——风函数, $f(u) = 0.35(1 + 0.15u)$;

u ——风速,单位 km/h;

P_a ——蒸发表面上的空气的蒸气压,单位 kPa;

B ——空气相对湿度倒数;

A ——土壤表面相对湿度倒数。

1.2 非饱和土的蒸腾理论

植物体吸收的绝大部分水分都被通过蒸腾作用散失到大气中,仅有极少部分被植物吸收储存在细胞中参与代谢^[8]。土体的蒸发与植物的蒸腾之和称为蒸散^[3],土体蒸发与植物蒸腾的总耗水量称为蒸散量。考虑植物蒸腾作用时的土壤表面实际蒸发率为^[7]:

$$E_s = AE \{1 - (-0.21 + 0.7 \sqrt{LAI})\} \quad (2)$$

式中:LAI——植被的叶面积指数,可以定义为每平方米地表面积上覆盖植物的叶片总面积^[1],单位 m^2/m^2 ;

E_s ——考虑植被蒸腾作用时的实际蒸发率,单位 mm/d。

植物潜在蒸腾量为^[7]:

$$PT = PE(-0.21 + 0.7 \sqrt{LAI}) \quad (3)$$

式中:PT——植物潜在蒸腾率。它是充分供水条件下的蒸腾率,单位 mm/d。

PE——土壤表面潜在蒸发率。它是充分供水条件下的蒸发率,可由 Penman 蒸发公式计算得到,单位 mm/d。

实际蒸腾率的大小将由当前负孔隙水压力下的植

物湿度界限函数值 f_{PML} 决定^[7]：

$$AT = \frac{2PT}{R_T} \left(1 - \frac{R_n}{R_T}\right) A_n f_{PML} \quad (4)$$

式中： AT ——植物实际蒸腾率，mm/d；

R_T ——根区总厚度，单位 m；

R_n ——模拟中的节点深度，单位 m；

A_n ——模拟中节点的作用区域；

f_{PML} ——当前负孔隙水压力下的植物湿度界限函数值，称为植物湿度界限因子。

2 边坡危险滑动带

极限平衡法在计算边坡稳定性系数时会根据用户指定参数计算大量不同位置滑面的稳定性系数，然后将稳定性系数最小的滑面作为最危险滑动面。如果把稳定性系数处于某一指定范围的所有有效试算滑动面归类到一个条带中，并给条带涂上特定的颜色，用来显示稳定性系数在此范围内的所有试算滑面所处的区域，这就是安全图。安全图不仅能清晰地显示出最危险滑动面的位置，同时还可以显示出在一定稳定性系数范围内的潜在危险滑动面所在的区域。当稳定性系数范围以区间形式表示为[最小稳定性系数，最小稳定性系数 + A]时，该稳定性系数范围所对应的安全图便代表了边坡最危险的滑动带，可以将其定义为“边坡危险滑动带”。区间的长度值 A 可以定义为“稳定性系数增量”，它的大小决定了边坡危险滑动带范围的大小。通过以较小的增量值（建议取 0.01）逐步递增 A 值，观察危险滑动带剪入区域与剪出区域范围及其增加趋势，可以全面地反映出边坡的失稳特征。

3 实例分析

考虑天气影响的排土场边坡稳定性计算是在地表环境下非饱和区渗流分析软件 VADOSE/W、边坡稳定性极限平衡分析软件 SLOPE/W 以及岩土应力变形分

析软件 SIGMA/W 平台上实现的。首先在 VADOSE/W 中进行天气影响下的温度 - 渗流直接耦合分析，然后利用 VADOSE/W、SIGMA/W 和 SLOPE/W 的分析结果和计算模型共享能力，将 VADOSE/W 保存的不同时刻的瞬态孔隙水压力计算结果分别导入 SIGMA/W 和 SLOPE/W，进行温度 - 渗流 - 应力间接耦合分析和边坡稳定性极限平衡分析，得到相应时刻瞬态孔隙水压力分布条件下的应力变形特征和考虑天气影响的边坡稳定性系数，并与非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 分析所得到的不考虑天气影响的边坡稳定性计算结果进行对比。本文采用 Spencer 法计算边坡稳定性系数。

3.1 计算模型及参数

某排土场属于露天铁矿排土产生的山坡型外排土场，排弃物自上而下分为松散、稍密、中密 3 层碎石土，均属于不均匀的碎石土层，主要由页片状粘土岩和灰岩碎块填成，含块石、岩屑及少量粘性土，偶见砖块、瓦片、木屑。原始地形为平缓斜坡，地基主要为强度指标较高的灰岩。根据该排土场实测地质剖面图建立适当简化的典型剖面 and 计算模型，见图 1。下部台阶高度 26.4 m，台阶坡面角 35°，上部台阶高度 12.9 m，台阶坡面角 41°，上下台阶间平台宽度 1.5 m，顶部平台坡度 1.5°。计算模型初始地下水位按水平处理，高程取坡脚实测地下水位高程 35.57 m。采用 VG 模型获取土水特征曲线和渗透系数函数，岩土层物理力学和 VG 模型参数根据岩土工程勘察报告等相关资料确定（表 1）。碎石土、粘土（岩）、灰岩的导热系数分别取 5.8 J/(m·℃·s)、1.5 J/(m·℃·s)、1.78 J/(m·℃·s)，质量比热分别取 0.96 J/(g·℃)、0.71 J/(g·℃)、1.2 J/(g·℃)。在计算剖面坡肩处从坡面到地下水位 74.7 ~ 34.2 m 高程范围内选取若干节点作为孔隙水压力变化监测点，见图 1 中的蓝色节点。

表 1 岩土层物理力学和 VG 模型参数建议值

Table 1 Recommended values of mechanical and VG model parameters of rocks and soils

岩土层	天然重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量 E/kPa	泊松比 ν	有效内摩 擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	有效粘聚力 c'/kPa	饱和渗透系数 $k_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	VG 模型参数			
							饱和体积含 水量 θ_s	残余体积含 水量 θ_r	a	n
松散碎石土	19.6	13 000	0.32	30	3	3.472×10^{-4}	0.294	0.05	3.170	1.782
稍密碎石土	21.5	20 000	0.34	32	8	2.604×10^{-4}	0.288	0.05	3.170	1.782
中密碎石土	22.6	39 000	0.37	34	10	1.736×10^{-4}	0.281	0.05	3.170	1.782
粘土	19.0	11 500	0.25	17	32.5	1.0×10^{-9}	0.432	0.195	10.359	1.896
粘土岩	23.5	44 000	0.32	24	95	1.0×10^{-6}	0.504	0.195	10.359	1.896
灰岩	25.4	3.16×10^{-7}	0.34	39	4 000	1.0×10^{-9}	0.400	0.188	9.109	2.616

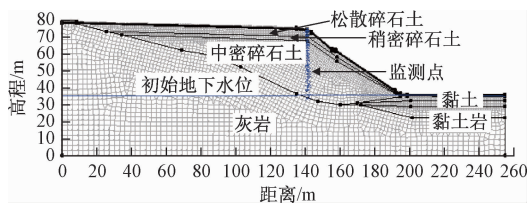


图1 排土场计算剖面及网格划分

Fig.1 Calculation section and mesh of the waste dump slope

3.2 模型边界及初始条件

3.2.1 植被边界条件

根据现场勘察所得植被类型及发育情况, LAI 取 1.5, 根系深度取 30 cm。国内外研究显示^[9-10], 一次降雨过程中, 草本植物的植被冠层截留容量一般不超过 2 mm, 且截留容量与叶面积指数呈近似线性关系。考虑到该排土场植被发育程度一般且主要为草本植物, 截留容量取 1 mm。植物湿度界限函数参考有关文献^[1,8] 确定, 当吸力为 0 kPa 时, $f_{PML} = 1$; 而当吸力达到 1 500 kPa 时, $f_{PML} = 0$ 。

3.2.2 天气边界条件

天气影响分析总历时为 3 d, 其中降雨历时 1 d, 雨后历时 2 d。除降雨量、地表净辐射外, 其它天气参数根据该排土场所在地 2017 年 7 月 1 日到 2017 年 7 月 3 日实测 24 h 气象数据确定(表 2)。其中 7 月 1 日为雨天, 7 月 2 日和 3 日为多云天气。为考虑最不利工况, 7 月 1 日的降雨量取矿区历史气象记录中的日最大降雨量 211.5 mm/d, 降雨强度在降雨开始和降雨结束时刻为 0, 在降雨持续时间的中值时刻为最大值。地表净辐射在日出之前以及日落之后为 0, 在 12 时为最大值。空气温度在日出时为最低值, 在 12 时为最高值。相对湿度在日出时为最大值, 在 12 时为最小值。日出时刻和日落时刻由软件根据输入的纬度值(北纬 30.2°)和日期值自动估算得到。风速取当天实测 24 h 风速值的平均值。地表净辐射采用 FAO Penman-Monteith 公式估算得到。天气参数的分布模式选择为正弦曲线型分布, 即上述气象数据在从最小值向最大值(或从最大值向最小值)变化的过程中均按照正弦曲线规律递增(或递减)。

3.2.3 渗流边界及初始条件

模型底部边界设为不透水边界, 两侧边界地下水位以上设为零流量边界, 上部边界施加天气边界条件。由松散碎石土的天然含水率 4.1% 和天然重度 19.6 kN/m³, 根据文献[11]推导的体积含水量计算公

式得到其天然体积含水量 θ 为 0.079, 对照其土水特征曲线, 相应的基质吸力约为 45 kPa, 即计算剖面最大基质吸力。初始地下水位以上, 负孔隙水压力近似按照静流体力学的规律随距离变化。参考有关文献^[12], 假定模型初始处于常温状态, 初始温度取 7 月 1 日 0 时实测大气温度 23.8 ℃。

表 2 天气边界条件

Table 2 Weather boundary conditions

日期	温度/℃		相对湿度/%		风速/ (m·s ⁻¹)	降雨量 /mm	降雨 开始 时间	降雨 结束 时间	地表净 辐射/ (MJ/ (m ² ·d))
	最大	最小	最大	最小					
20170701	24.6	22.6	99	92	3.4	211.5	0	24	4.1
20170702	29.5	23.1	99	72	1.6	-	-	-	8.2
20170703	31.4	24.2	99	64	1.9	-	-	-	8.1

3.3 渗流及稳定性变化规律分析

图 2 显示了部分监测点孔隙水压力值的变化情况。有蒸散和植物截留时, 在第 1 天约 4 m 和第 3 天约 7 m 的雨水入渗深度内, 孔隙水压力均不同程度地低于无蒸散和植物截留时的孔隙水压力, 第 1 天和第 3 天边坡表面孔隙水压力分别约为 -9.8 kPa 和 -24.0 kPa, 比无蒸散和植物截留时的边坡表面孔隙水压力 -8.7 kPa 和 -21.3 kPa 分别低 1.1 kPa、2.7 kPa, 说明蒸散和植物截留对边坡浅层土体水分产生了明显的消耗, 蒸散作用下累积水分消耗量随着时间增长越来越大, 雨后的边坡浅层水分疏干速度也更快。

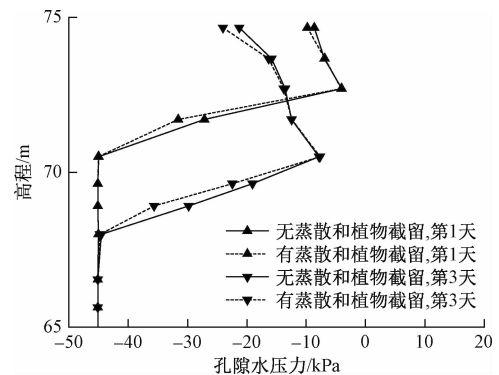


图2 监测点孔隙水压力值

Fig. 2 Pore-water pressure of monitoring points

图 3 显示了时间间隔为 3 h 的累积蒸发蒸腾量时程曲线, 可见其在一天之内的变化规律与地表净辐射变化规律一致。由于土体不饱和, 实际蒸散量小于潜在蒸发量, 而实际蒸腾量则是略高于实际蒸发量。3 d 总累积实际蒸发量为 2.709 mm, 其中第 1、2、3 天的日累积实际蒸发量分别为 0.507 mm、1.063 mm、

1.139 mm。虽然第3天的地表净辐射略小于第2天,但由于风速大于第2天,日累积实际蒸发量仍然比第2天高了0.076 mm。3天总累积实际蒸腾量为3.280 mm,其中第1、2、3天的日累积实际蒸腾量分别为0.618 mm、1.287 mm、1.375 mm。由于第3天的气温高于第2天,其日累积实际蒸腾量比第2天高了0.088 mm。

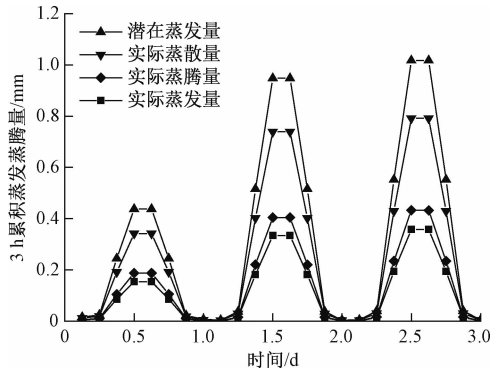


图3 排土场3 h累积蒸发蒸腾量时程曲线
Fig. 3 Time history curve of 3 hours cumulative evapotranspiration of the waste dump slope

排土场边坡稳定性系数时程曲线见图4。降雨期间排土场边坡稳定性系数下降速度呈现出先慢后快的趋势,雨后仍然继续降低至最小值,然后才开始缓慢增大。有蒸散和植物截留时,其稳定性系数全程均大于无蒸散和植物截留时的稳定性系数,第1天降雨结束时,稳定性系数为1.096,比无蒸散和植物截留时的稳定性系数1.061高0.035,增加率为3.3%。雨后,稳定性系数在第2天降低至最小值1.079,表明排土场容易在雨后1天内发生滑坡。稳定性系数最小值出现时间比无蒸散和植物截留时的第1天晚了1天,稳定性系数最小值比无蒸散和植物截留时的1.061高0.018,增加率为1.7%。综上所述,考虑蒸散和植物截留时,稳定性系数在雨中降幅更小,雨后则继续降低,稳定性系数最小值更大。研究表明,降雨后,因为雨水的入渗而使岩土基质吸力下降,边坡可能会因为稳定性继续降低而发生雨后滑坡,考虑蒸散和植物截留时,边坡稳定性变化规律能够更加准确地反映出降雨导致边坡失稳的滞后效应。仅考虑蒸散不考虑植物截留时,稳定性系数时程曲线与同时考虑蒸散和植物截留时几乎重合,表明在降雨总量以及强度均很大的条件下,稳定性系数增量主要是由蒸散贡献的,草本植物截留几乎不对排土场稳定性产生影响。

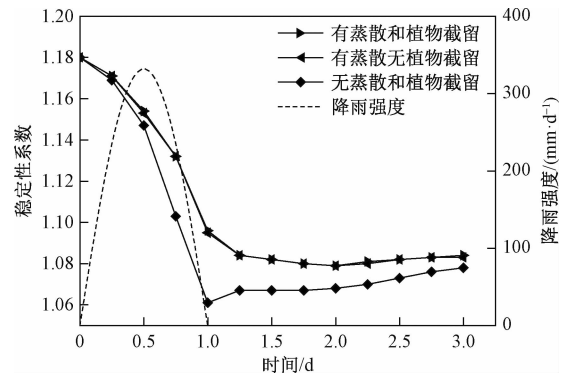


图4 排土场稳定性系数时程曲线
Fig. 4 Time history curve of stability coefficient of the waste dump slope

3.4 应力及滑坡特征分析

该排土场曾发生一次由两次滑动最终形成的典型滑坡事故。第一次滑动的滑坡壁上缘已成负角,中部渐缓,到滑坡脚近水平状。滑坡舌厚度约3 m,宽约30 m,高度约20 m。第二次滑动位于第一次滑动东北方向约3 m处,滑坡上缘近于垂直,弯向滑坡台阶,呈不规则圆弧形。滑坡脚处的滑坡舌与第一次滑坡舌混在一起,滑坡舌厚度约4 m,滑坡宽度平均值约25 m,滑坡高度约25 m,属小型浅层滑坡。有蒸散和植物截留作用时,第2天的排土场剪应变情况见图5。图中红色虚线上部土体为剪应变较大区域,可见其主要位于坡面松散碎石土范围以内,高度约34 m,平均厚度不大于4 m,表明排土场容易发生浅层滑坡。排土场剪应变分析结果与典型滑坡基本一致。

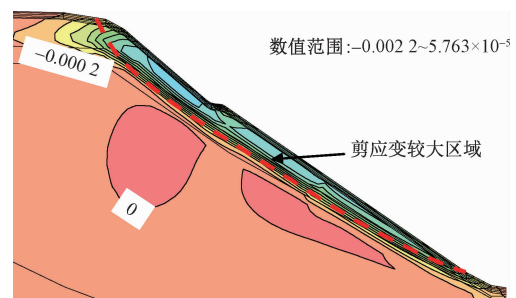


图5 第2天的剪应变等值线
Fig. 5 Contours of shear strain at the second day

考虑蒸散和植物截留时,第2天的最危险滑面及危险滑动带见图6,红色危险滑动带内的白色滑面即最危险滑动面。可见边坡最危险滑动面处于上部台阶,滑体高度约为11.8 m,厚度约3 m,与该排土场典型滑坡的滑体相比,厚度基本一致,而高度明显小于典型滑坡体的约20 m和25 m,这表明极限平衡法由于

未考虑岩土体应力应变关系,对于非均质边坡而言,其最危险滑动面并不能准确反映实际滑坡的全部特征。稳定性系数增量 A 取 0.01 时,危险滑动带内滑面安全系数范围为 1.079 ~ 1.089,稳定性系数增加率仅约为 0.9%,可以认为危险滑动带内滑面的滑坡危险程度十分接近,都属于高危险性滑面。危险滑动带剪出区域的范围远大于剪入区域,且剪出区域主要位于下部台阶,表明该排土场除了最危险滑面,也极有可能发生从下部台阶剪出的、滑体高度更高的滑坡,更加全面准确地反映出了典型滑坡的高度特征。当 A 以等额差值 0.01 递增时,剪出区域范围增加量也远大于剪入区域范围增加量,表明整个下部台阶都是高危险性滑坡的可能剪出区域,印证了发生高度更高的滑坡的可能性。危险滑动带位于松散碎石土范围内,表明排土场容易发生浅层滑坡,也与典型滑坡一致。

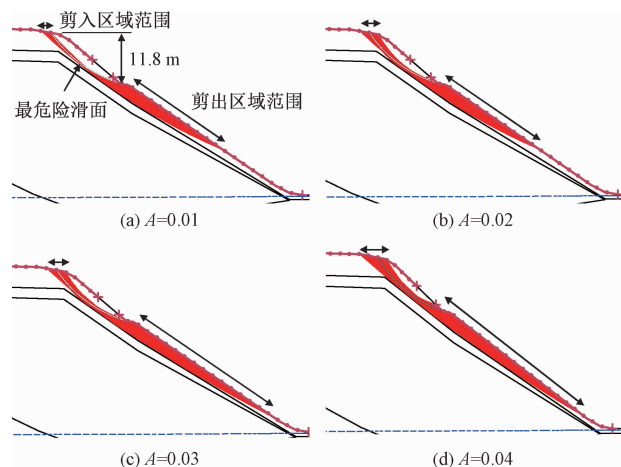


图 6 第 2 天的最危险滑面及危险滑动带

Fig. 6 Critical slip surface and slip zone at the second day

4 结论

(1)考虑天气影响时,由于蒸散和植物截留对浅层土体水分的消耗,雨水入渗深度范围土体孔隙水压力均会不同程度地低于无蒸散和植物截留时的孔隙水压力,雨后边坡浅层水分疏干速度更快。实际蒸发量、潜在蒸发量、实际蒸腾量变化规律都与地表净辐射变化规律一致。

(2)无蒸散和植物截留时,边坡稳定性系数在降雨结束时降至最低值,雨后立即开始增大。有蒸散和植物截留时,由于边坡水分持续消耗,其稳定性系数全程均大于无蒸散和植物截留时的稳定性系数,并且雨后仍然继续降低至最小值,然后才开始缓慢增大,稳定性系数最小值出现时间比无蒸散和植物截留时更晚,

表明雨后一段时间内滑坡风险仍在不断增加,更加准确地反映出降雨导致边坡失稳的时间滞后效应。

(3)对于非均质边坡,采用极限平衡法分析边坡失稳特征时,由于不能考虑岩土体应力应变关系,所得最危险滑动面有时不能全面反映边坡失稳特征,而本文提出的边坡危险滑动带分析方法则能弥补这一缺陷,通过递增稳定性系数增量 A 来观察最危险滑动带范围及其发展趋势,能够更加全面地反映出边坡滑坡类型和特征。

参考文献:

- [1] 陈建斌,孔令伟,赵艳林,等. 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1767-1772.
CHEN Jianbin, KONG Lingwei, ZHAO Yanlin, et al. On influence factors of suction and deformation of unsaturated soil under evaporation and transpiration effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1767-1772.
- [2] 桂勇,邓通发,罗嗣海,等. 考虑力学水文双重效应的生态边坡长期稳定性分析[J]. 公路, 2014, 4: 209-216.
GUI Yong, DENG Tongfa, LUO Sihai, et al. Study of long-term stability of ecological slope with double effect of mechanics and hydrology[J]. Highway, 2014, 4: 209-216.
- [3] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1-47.
- [4] MARTIN Dehn, GERD Bürger, JELLE Buma, et al. Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling[J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 193-204.
- [5] JOCHEN Schmidt, RICHARD Dikau. Modeling historical climate variability and slope stability[J]. Geomorphology, 2003, 60(3-4): 433-447.
- [6] WILSON G W. Soil evaporation fluxes for geotechnical engineering problems[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1990.
- [7] GEO-SLOPE International Ltd. Seepage Modelling with Vadose/W 2007, Third Edition: An Engineering Methodology[R]. Alberta: GEO-SLOPE International Ltd Printed, 2008.

(下转第 120 页)