

持续暴雨作用下排土场层状碎石土边坡稳定性

郑开欢¹⁾✉, 罗周全¹⁾, 罗成彦²⁾, 文磊¹⁾

1) 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083 2) 中钢集团武汉安全环保研究院矿山安全健康技术研究中心, 武汉 430081
✉ 通信作者, E-mail: 276774457@qq.com

摘要 为了研究排土场层状碎石土边坡在持续暴雨条件下的入渗过程及稳定性, 推导了土体天然含水率、天然重度与天然体含水量的换算公式, 作为快速确定边坡土体初始基质吸力分布的依据。建立算例排土场有限元分析模型, 进行降雨条件下饱和-非饱和渗流、孔压-应力耦合以及边坡稳定分析。结果表明: 持续暴雨作用下排土场会在透水性最强的边坡浅层形成集中渗流通道, 当坡底存在弱透水性土层时会切断渗流通道, 导致雨水从坡脚涌出; 排土场边坡位移在降雨期间不断增长, 但增长速度越来越慢, 雨后边坡位移立即开始减小; 降雨初期边坡稳定性系数下降较快, 边坡浅层渗流稳定后基本保持不变, 雨后缓慢增大。排土场层状碎石土边坡在持续暴雨作用下容易在降雨中后期失稳。

关键词 排土场; 暴雨; 渗流; 吸力; 稳定性分析
分类号 TD854

Layered gravel soil slope stability of a waste dump considering long-term hard rain

ZHENG Kai-huan¹⁾✉, LUO Zhou-quan¹⁾, LUO Cheng-yan²⁾, WEN Lei¹⁾

1) Faculty of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2) Research Center of Safety and Health in Mine, Sinosteel Corporation Wuhan Safety Environmental Protection Research Institute, Wuhan 430081, China
✉ Corresponding author, E-mail: 276774457@qq.com

ABSTRACT In order to examine the effect of long-term hard rain on the layered gravel soil slope stability of a waste dump, the formula derivation relating natural water content, natural unit weight and natural volumetric water content was conducted to help to confirm the initial suction of the slope rapidly. A numerical analysis model of a waste dump with a layered gravel soil slope based on the finite element method was established to analyze the saturated-unsaturated seepage, coupled stress-pore pressure and slope stability. The results show that a seepage channel will be formed in the slope surface due to its high permeability during the rain. If there exists a water-resisting soil layer in the bottom of the slope, water will come out from the slope toe. The displacement of the slope increases with a decreasing rate during the rain and decreases immediately after the rain. The stability coefficient of the slope decreases rapidly at the beginning of the rain. Then the stability coefficient barely changes till the rain stops as the seepage in the slope surface becomes stable. After the rain, the stability coefficient increases slowly. It is most possible for the layered gravel soil slope of a waste dump to fail in the middle and late stages of long-term hard rain.

KEY WORDS waste dump; hard rain; seepage; suction; stability analysis

露天矿开采、道路修筑等施工过程中剥离的岩土集中堆置后会形成排土场。排土场通常自下而上分层堆排, 形成独特的层状结构。降雨是诱发排土场滑坡

的一个重要因素, 因为地球表面的土大多是非饱和土, 排土场也不例外。降雨影响下, 非饱和土边坡最易发生平行于边坡表面的浅层破坏^[1-5]。从力学角度来说,

非饱和土与饱和土的差异主要体现在非饱和土中存在负的孔隙水压力(或基质吸力),降雨入渗会引起非饱和土的负孔隙水压力升高(或基质吸力降低)。基质吸力对土体的作用与饱和土中的正孔隙水压力相反,属于负孔隙水压力,由于其符号规定为正,所以基质吸力等于负孔隙水压力的绝对值,负孔隙水压力升高表示基质吸力降低。进行排土场边坡稳定分析时,由于浅层滑坡一般都发生在非饱和土中,如果对地下水位以上由基质吸力提供的那部分抗剪强度忽略不计,将产生相对较大的误差^[6]。一些学者对降雨条件下的碎石土边坡渗流及稳定特性进行了研究,李静^[1]通过物理模拟和数值模拟方法研究了降雨强度、降雨持时、前期降雨、渗透系数和各向异性对碎石土边坡渗流场的影响,发现降雨强度相对于土体入渗能力较小或相近时,随着降雨强度的增大斜坡的安全稳定性下降;当降雨强度大于土体的入渗能力时,随着降雨强度的继续增大稳定系数降低的幅度变缓。宁万辉等^[2]通过实验分析了降雨作用下碎石土边坡的变形破坏机理及降雨诱发滑坡的主要作用方式,认为降雨强度、地下水位、降雨持续时间是影响坡体稳定的重要因素。孔郁斐等^[3]采用有限元法研究了降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响规律,发现雨停后随着雨水继续下渗,边坡安全系数还有可能在数小时至数天内继续减小。上述研究涉及降雨条件下碎石土边坡稳定的许多方面,也对稳定性系数变化规律进行了研究,但目前对稳定性系数变化原因的研究较少。本文通过模拟降雨条件下排土场层状碎石土边坡内部的饱和-非饱和和渗流场,分析持续暴雨条件下排土场层状碎石土边坡内部渗流、土体含水量、位移变化规律以及滑坡特征,并从水分运移角度对持续暴雨作用下的排土场边坡稳定性变化原因进行了探讨。

1 非饱和土体应力及渗流计算原理

1.1 非饱和土体有效应力原理

非饱和土由土颗粒、水和空气三相组成,对非饱和土中任意研究平面,其面积 A 由三相各自所占面积组成,即 $A = A_s + A_w + A_a$ 。其中 A_s 为土颗粒接触面积, A_w 为孔隙水所占面积, A_a 为孔隙气所占面积。Bishop 提出的非饱和土有效应力原理为

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

式中 σ' 为土体有效应力, σ 为土体总应力, u_a 为孔隙气压力(通常等于 0), u_w 为孔隙水压力, $\chi = A_w/A$ 为有效应力参数,与非饱和土的饱和度、结构、应力历史等因素有关,其值为 0~1。当饱和度为 1 时, χ 等于 1,式(1)简化为 $\sigma' = \sigma - u_w$,此即饱和土有效应力原理;当饱和度为 0 时, χ 等于 0,式(1)简化为 $\sigma' = \sigma - u_a$,此即干土有效应力原理。

1.2 非饱和土体抗剪强度理论

Fredlund 等于 1978 年提出了用净法向应力($\sigma - u_a$)和基质吸力($u_a - u_w$)这两个独立的应力变量描述的非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

式中: σ_n 为滑动面上的法向总应力; c' 为有效黏聚力; ϕ' 为有效内摩擦角; ϕ^b 为吸力内摩擦角,为基质吸力的函数,随着基质吸力增加而减小; $(u_a - u_w) \tan \phi^b$ 为与基质吸力直接相关的抗剪强度,称为基质吸力的附加强度。

1.3 非饱和土体渗流理论

Richards 基于 Darcy 定律提出了非饱和土的渗流计算公式:

$$v = K_{us} J \quad (3)$$

式中: v 为非饱和土体内的渗流速度; K_{us} 为非饱和土体的渗透系数,主要受非饱和土体含水量影响; J 为非饱和土体的水力梯度,包括位置水头和基质势水头。 K_{us} 可以通过实验确定,也可以采用经验公式和理论公式计算,由于实验操作复杂,且具有较大的随机性,因此常通过公式进行计算。

1.4 非饱和土体土-水特征曲线与渗透系数函数

土-水特征曲线(soil-water characteristic curve,简称 SWCC)即土的含水量与基质吸力的关系曲线。土的含水量可以是体积含水量、含水率或饱和度。众多研究者常用经验公式如 Van Genuchten 模型(简称 VG 模型)、Fredlund 和 Xing 模型来确定土的含水量与基质吸力的关系曲线(土-水特征曲线)。本文采用 VG 模型获取土-水特征曲线^[7-9]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (4)$$

式中 θ 为体积含水量, θ_s 为饱和体积含水量; θ_r 为残余体积含水量; ψ 为基质吸力; a 、 n 和 m 为 VG 模型拟合参数, $m = 1 - 1/n$ 且 $0 < m < 1$ 。

非饱和土体的渗透系数为体积分含水量的函数,即渗透系数函数。渗透系数函数反映土体在非饱和区导水的快慢。渗流是土体中液态形式的水沿着相互连接的网状连续通道流动。土体含水量的降低会导致这些通道的大小和数量减少,进而导致土体的导水能力降低。由于非饱和土的孔隙水压力和渗透系数都与体积分含水量存在函数关系,根据土壤土-水特征曲线,可以推测土壤的非饱和和渗透系数函数^[10]。

1.5 土体天然体积分含水量公式推导

降雨前排土场岩土层的基质吸力可以根据降雨前土体体积分含水量,查土-水特征曲线得到。因此,需要根据实验得到的天然含水率和天然重度来确定土体的天然体积分含水量 θ 。天然体积分含水量 θ 计算公式推导

如下.

碎石土天然密度为

$$\rho_s = \frac{(1 + e)\gamma}{(1 + \omega)g} \quad (5)$$

碎石土天然体积含水量为

$$\theta = \frac{\omega\rho_s}{(1 + e)\rho_w} \quad (6)$$

将式(5)带入式(6)得

$$\theta = \frac{\omega\gamma}{(1 + \omega)\rho_w g} = \frac{\omega\gamma}{(1 + \omega)\gamma_w} \quad (7)$$

式中 ρ_s 和 ρ_w 分别为土粒和水的密度, e 为孔隙比, γ 为天然重度, g 为重力加速度, ω 为土体天然含水率, γ_w 为水的重度.

2 实例分析

考虑降雨入渗条件下的排土场边坡稳定性计算是在二维非饱和土体渗流分析软件 SEEP/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 SEEP/W 中进行降雨条件下的饱和-非饱和渗流分析, SEEP/W 软件会按照事先设定的渗流分析结果保存时间间隔自动保存不同时刻的瞬态孔隙水压力分布结果, 然后利用 SEEP/W、SIGMA/W 和 SLOPE/W 的分析结果和计算模型共享能力, 将 SEEP/W 保存的不同时刻的瞬态

孔隙水压力分布分别导入 SIGMA/W 和 SLOPE/W, 进行孔压-应力耦合分析和边坡稳定分析, 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边坡稳定性系数. 本文采用 Spencer 法进行边坡稳定分析.

2.1 计算模型及参数

根据某矿业公司山北东排土场现状地形图和原始地形图选取并建立典型剖面, 见图 1. 排土场自上而下分为三层, 分别为松散的碎石土(1-1)、稍密的碎石土(1-2)和中密的碎石土(1-3). 典型剖面下部台阶高度为 26.43 m, 台阶坡面角为 35°, 上部台阶高度为 12.90 m, 台阶坡面角为 41°, 上下台阶间平台宽度为 1.5 m. 顶部平台坡度为 1.5°, 基底平均坡度为 13°. 图 1 中红色虚线框所示剖面部分即计算模型范围. 初始地下水水位高程一般会随地形、岩性等有所变化, 考虑到计算模型初始地下水水位大部分位于透水性很弱的灰岩中, 初始地下水水位高程变化对排土场非饱和渗流模拟影响很小, 本文简化为按水平处理, 其高程取排土场地质剖面图的实测地下水水位高程 35.57 m, 距坡底面 0.6 m. 排土场计算模型有限单元网格如图 2 所示. 在计算剖面坡肩处从坡面到地下水水位约 76 ~ 35 m 高程范围内选取若干节点, 以便分析降雨过程中边坡内部孔隙水压力在深度上的变化规律.

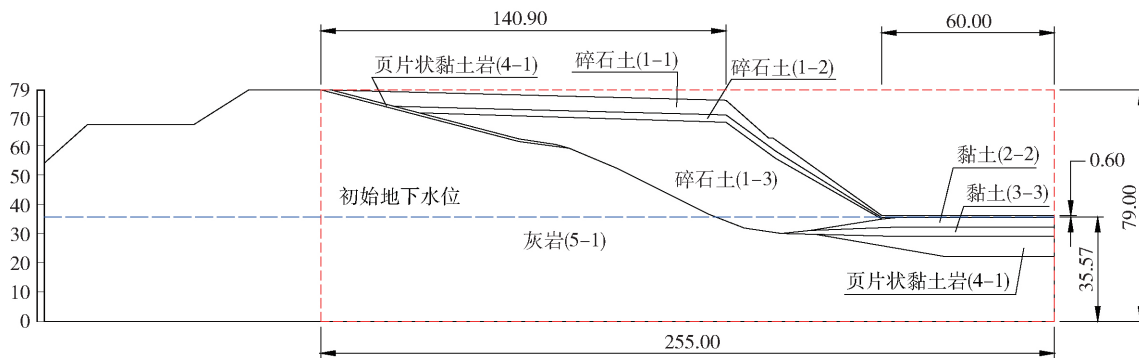


图 1 计算模型范围(单位: m)

Fig. 1 Range of the calculation model (unit: m)

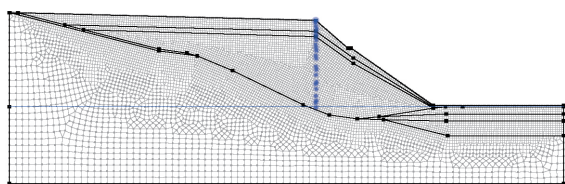


图 2 模型网格划分及所选节点

Fig. 2 Mesh and the selected nodes of the calculation model

排土场各岩土层物理力学参数根据岩土工程勘察报告等相关资料确定, 见表 1. 典型剖面中, 碎石土(1-1)、碎石土(1-2)、碎石土(1-3)、黏土岩(4-

1) 和灰岩(5-1) 在降雨时存在非饱和渗流, 需要定义其土-水特征曲线和渗透系数函数. VG 模型参数结合勘察资料, 通过工程类比法选取.

2.2 模型边界及初始条件

2.2.1 降雨工况设计

为考虑最不利的降雨情况对边坡稳定性的影响, 根据矿区气象观测资料极值确定降雨工况. 乌龙泉矿区降雨工况见表 2. 数值模拟结果保存时间间隔取为 1 d. 为了重点考察雨后 24 h 内稳定性系数变化情况, 结果保存时间点增加 8.25、8.5 和 8.75 d 三个时间点.

表 1 排土场各岩土层物理力学和 VG 模型参数
Table 1 Mechanical and VG model parameters of different soil layers

岩土层	天然重度, $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量, E / kPa	泊松比, ν	有效内摩擦 角, $\varphi' / (^\circ)$	有效黏聚力, c' / kPa	饱和渗透系数, $k_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	VG 模型参数			
							θ_s	θ_t	a	n
碎石土(1-1)	19.6	13000	0.32	31	6.5	3.472×10^{-4}	0.294	0.05	3.170	1.782
碎石土(1-2)	21.5	20000	0.34	33	9.0	2.604×10^{-4}	0.288	0.05	3.170	1.782
碎石土(1-3)	22.6	39000	0.37	35	11.0	1.736×10^{-4}	0.281	0.05	3.170	1.782
黏土(2-2)	19.0	11500	0.25	17	32.5	1.0×10^{-9}	0.432			
黏土(3-3)	19.2	12000	0.25	16	30.5	1.0×10^{-9}	0.419			
黏土岩(4-1)	23.5	44000	0.32	24	47.5	1.0×10^{-6}	0.504	0.195	10.359	1.896
灰岩(5-1)	25.4	3.16×10^7	0.34	39	400	1.0×10^{-9}	0.400	0.188	9.109	2.616

表 2 降雨工况设计
Table 2 Design of the rainfall pattern

降雨工况	总降雨量 /	降雨历时 /	雨后历时 /	降雨强度 /
	mm	d	d	(mm · d ⁻¹)
暴雨	457	8	2	57.125

2.2.2 模型边界条件

根据本排土场实际情况,参考相关文献^[11-14]对降雨入渗模型边界条件的一般处理方法确定模型边界条件.模型底部边界设为不透水边界.模型两侧边界地下水以上按零流量边界处理,地下水以下为给定水头边界条件,水头值等于初始地下水位.模型上部边界施加正单元流量 q 来模拟降雨, q 值等于表 2 中的降雨强度.

2.2.3 模型初始条件

确定计算剖面初始孔隙水压力分布的理想方法是通过实验测定不同空间分布的土体含水量,拟合研究区域内节点的含水量,但实际操作比较繁琐.在缺少实测数据的情况下,通常结合工程实际情况对其作近似处理.通常,非饱和区基质吸力在浸润面上为零,向上随着岩土体含水量的降低而增大,超过最大毛细上升高度范围以后,基质吸力增幅较小^[15].土体中水的最大毛细上升高度与土体孔隙直径有关,土体孔隙直径越小,毛细上升高度越大,在无实测数据时通常进行假定.本文参考文献[16]取最大毛细上升高度为 7 m(对应排土场有限元模型高程 42.57 m),最大毛细上升高度范围内基质吸力增加值取为最大基质吸力的 0.6 倍.将碎石土(1-1)的天然含水率 4.1% 和天然重度 $19.6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,以及水的重度 $9.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 带入式(7)中,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,由于碎石土(1-1)主体部分位于坡顶,坡顶土体的基质吸力一般为边坡最大基质吸力,因此计算剖面最大基质吸力取为 45 kPa.运用 SEEP/W 的“Spatial Functions(空间函数)”功能,通过若干指定坐标和压力水头的数据点把

相应的正、负压力水头施加到计算剖面中,即在排土场有限元模型范围内的高程 0 m 处施加一排压力水头为 35.57 m(对应的孔隙水压力为 348.59 kPa)的数据点,在高程 35.57 m 处施加一排压力水头为 0 m(对应的孔隙水压力为 0 kPa)的数据点,在高程 42.57 m 处施加一排压力水头为 -2.76 m(对应的孔隙水压力为 -27 kPa)的数据点,在高程 76 m 处施加一排压力水头为 -4.59 m(对应的孔隙水压力为 -45 kPa)的数据点,即可得到碎石土(1-1)、碎石土(1-2)和碎石土(1-3)的初始基质吸力分布,见图 3.

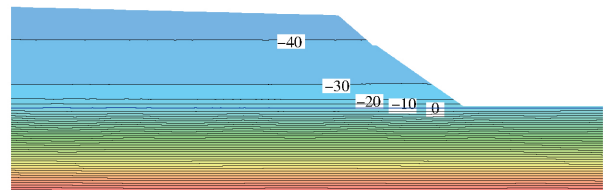


图 3 计算剖面初始孔隙水压力分布(单位: kPa)

Fig. 3 Initial pore-water pressure of the calculation profile (unit: kPa)

2.3 饱和-非饱和渗流计算结果分析

图 4 为排土场内部孔隙水压力的变化情况.降雨开始以后,排土场边坡浅层含水量开始增大,由于浅层土体渗透系数大,降雨未在表面形成积水,因此浅层土体基质吸力最小降低至 0~10 kPa.随着降雨的持续,基质吸力为 0~10 kPa 的土体范围逐步向深部扩展,第 8 天雨停时坡顶基质吸力处于 0~10 kPa 范围内的土体厚度已超过 6 m.雨后随着边坡浅层水分的继续下渗,边坡浅层含水量逐渐减小,基质吸力开始增大,到第 10 天,边坡浅层基质吸力最高已增至 20 kPa.

图 5 为所选节点不同时刻孔隙水压力值.高程处于 75.5 m 范围内的边坡浅层节点的孔隙水压力在降雨第 2 天就增大到了 -10 kPa 以上,之后随着降雨的持续,孔隙水压力在 -10 kPa 以上的节点逐渐向深部发展,降雨期间高程处于 60~75.5 m 范围内所选节点的孔隙水压力最大值达 -5.3 kPa.第 8 天和第 10 天

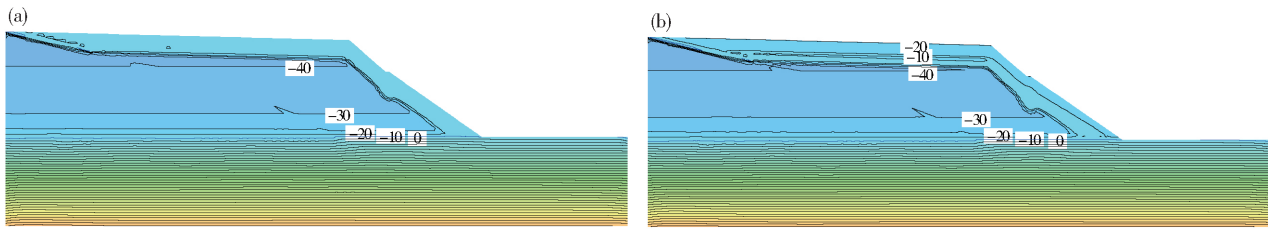


图 4 不同时刻的排土场孔隙水压力等值线(单位: kPa)。(a) 第 8 天; (b) 第 10 天

Fig. 4 Pore-water pressure contours of the waste dump at different moments (unit: kPa): (a) the 8th day; (b) the 10th day

孔隙水压力发生变化的高程处于 60 ~ 75.5 m 范围内节点的高程范围分别约为 75.5 ~ 64 m 和 75.5 ~ 63 m, 表明降雨期间坡肩部位雨水入渗深度约为 11.5 m, 雨后第 2 天雨水入渗深度约为 12.5 m.

这是由于排土场局部坡脚处不透水黏土形成的反坡高程高于坡底高程, 导致地下水还没到达坡脚就遇到不透水黏土层, 从而被迫从坡面涌出, 形成下降泉. 第 8 天坡脚处地下水位升至约 36.24 m, 比初始地下水位高了 0.67 m. 雨后, 边坡内部渗流流速减小, 坡脚涌水速度也呈减小趋势.

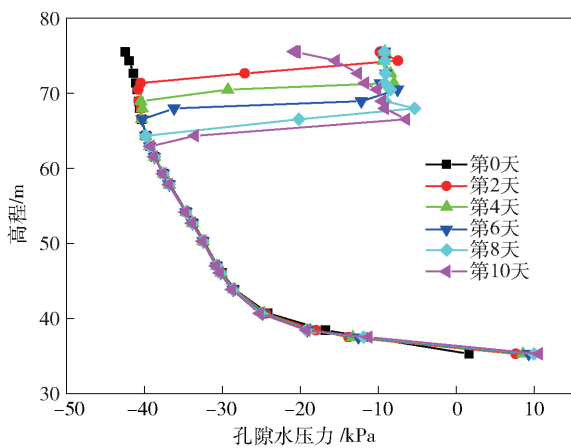


图 5 所选节点不同时刻孔隙水压力值

Fig. 5 Pore-water pressure of selected nodes at different moments

2.4 孔压-应力耦合计算结果分析

排土场最大位移随时间的变化见图 7. 其中 X 方向最大位移位于坡肩, Y 方向最大位移位于坡顶, X-Y 方向最大位移(即总最大位移)位于坡肩. 可见排土场 X 方向、Y 方向和总最大位移在第 1 天增加最大, 之后每天的最大位移增量逐渐减小. 第 8 天的最大位移分别达到了 7.841、12.160 和 14.000 mm. 降雨结束以后, 最大位移立即开始缓慢减小, 第 10 天的最大位移分别为 7.510、11.570 和 13.290 mm. 这是因为雨后水分下渗过程中, 浅部土体含水量减小, 基质吸力增大, 产生收缩, 并且其收缩大于深部土体因含水量增大而产生的膨胀.

图 6 为排土场内部渗流速度矢量的变化情况. 降雨开始以后, 由于边坡表层土体渗透系数较大, 渗流流速也较大, 大量雨水顺着表层土体内部渗流通道迅速向坡底聚集. 坡底处为渗透系数很小的黏土层, 阻断了边坡表层土体内部的渗流通道, 在第 2 天边坡内部水分开始从坡脚涌出, 之后随着降雨的持续, 涌水速度逐渐增大. 现场勘察表明, 在排土场勘察范围内见有三处间隙性下降泉, 泉水判定为排土场地下水, 大雨和暴雨时泉水水量很大, 流向山下的水塘中, 长期不下雨时无渗水流出. 泉水均出现在排土场下部台阶边坡接近坡底的坡面上, 下降泉形式与渗流分析中坡底处地下水向地面上方冲出形成上升泉的结果存在差异, 应

第 8 天的排土场剪应变情况见图 8. 剪应变较大区域位于坡面碎石土(1-1)和碎石土(1-2)范围内, 厚度不大于 5 m, 表明排土场容易发生浅层滑坡. 剪应变绝对值最大值为 0.2413%, 出现在上级台阶边坡坡脚处. 图 9 为山北东排土场的一次典型滑坡事故, 它经由两次滑动最终形成. 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. 滑坡裂缝充填少量黏性土碎石, 裂缝中无水, 滑坡舌厚度约 3 m, 滑坡边界清楚, 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. 裂缝中无水, 裂缝中部平直, 两端弯向滑坡台阶, 呈不规则圆弧形. 滑坡壁上缘宽约 38 m, 滑坡脚处的滑坡舌与

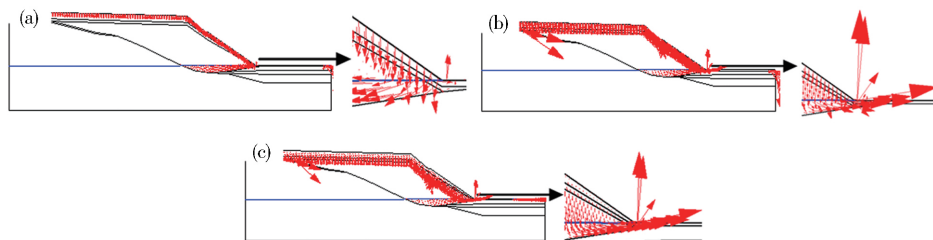


图 6 不同时刻的排土场渗流速度矢量。(a) 第 2 天; (b) 第 8 天; (c) 第 10 天

Fig. 6 Seepage velocity at different moments: (a) the 2nd day; (b) the 8th day; (c) the 10th day

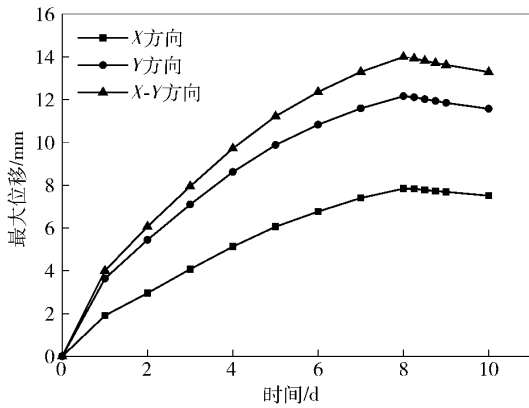


图7 排土场最大位移随时间的变化

Fig. 7 Relationship between maximum displacement and time

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. 排土场剪应变分析结果与“山东北排土场局部边坡存在小~中型浅层滑塌现象”的现场观测结果一致. 根据非饱和渗流计算结果, 降雨第 8 天, 边坡表面大约 6 m 深度范围的碎石土的基质吸力均降至 0 ~ 10 kPa 的最小范围, 图 9 中滑坡的第一次滑动滑坡舌厚度约 3 m, 第二次滑动滑坡舌厚度约 4 m, 两次滑动滑坡舌厚度均不大于 6 m, 表明典型滑坡的滑坡面在边坡基质吸力的最小范围之内, 典型滑坡的滑坡特征与边坡非饱和渗流计算结果是相符的.

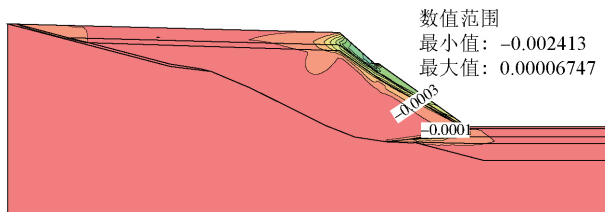


图8 第8天的剪应变等值线

Fig. 8 Shear strain contours at the 8th day



图9 山东北排土场典型滑坡

Fig. 9 Typical landslide of Shanbeidong waste dump

2.5 排土场边坡稳定性变化规律及原因探讨

由表 3 可知排土场边坡稳定性系数在降雨开始后的前 4 d 内降低幅度最大, 由 1.308 降低到 1.209, 之后降低幅度很小, 第 5 天降至 1.208, 第 7 天降至最小值

1.207. 稳定性系数总共降低 0.101, 降低率为 7.7%. 之后直到第 8 天降雨停止, 稳定性系数保持不变. 从图 5 可以看出, 降雨开始后的第 4 天, 边坡浅部约 5 m 深度范围内土体孔隙水压力全部增加到了 -10 kPa 以上, 之后随着降雨的持续, 这部分土体的孔隙水压力基本保持不变. 这表明在持续暴雨作用下, 排土场边坡浅层在降了 4 d 雨后就形成较稳定的渗流, 土体含水量变化很小, 因此稳定性系数也基本保持不变. 雨停后, 边坡浅层土体含水量开始减小, 孔隙水压力逐渐降低, 稳定性系数开始缓慢匀速增大. 分析结果表明山东北东排土场在持续暴雨作用下容易在降雨中后期失稳. 第 8 天时稳定性系数为 1.207, 大于 1, 但实际上排土场还是发生滑坡. 这可能是由于以下原因导致的: 首先, 排土场排土过程中可能存在局部堆排不当, 排土参数控制不严现象, 如局部边坡角过大; 其次, 实际上排土场所在地的短期降雨强度有可能大于本文数值模拟中设置的降雨强度, 导致边坡稳定性系数进一步降低. 最后, 数值模拟的土体强度参数来自现场取样实验结果, 具有一定的随机性, 排土场局部土体的实际强度有可能低于数值模拟中设置的土体强度.

表3 降雨开始后不同时间的排土场边坡稳定性系数

Table 3 Stability coefficient of the waste dump slope after raining for different time

时间/d	稳定性系数	时间/d	稳定性系数
0	1.308	7	1.207
1	1.288	8	1.207
2	1.264	8.25	1.209
3	1.232	8.5	1.211
4	1.209	8.75	1.214
5	1.208	9	1.216
6	1.208	10	1.224

雨后所选节点不同时刻孔隙水压力值见图 10. 可见雨后排土场边坡浅层 5 m 深度范围内孔隙水压力整

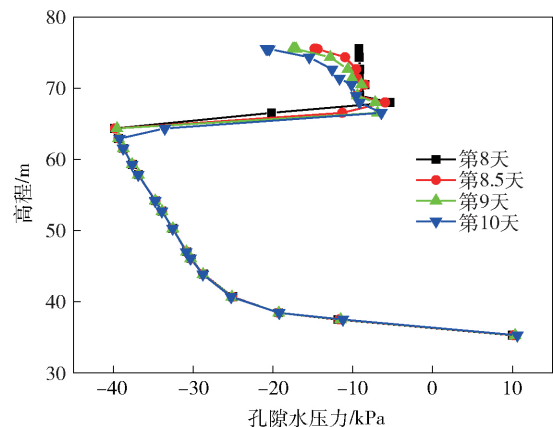


图10 所选节点雨后不同时刻孔隙水压力值

Fig. 10 Pore-water pressure of selected nodes at different moments after rain

体呈减小趋势,且随着深度的增加减小幅度越来越小,说明雨后边坡水分由浅层转移到更深的部位,导致边坡浅层含水量整体降低,且深度越浅水分疏干越快.由图 11 知第 8 天和第 10 天的最危险滑面位置基本不变.两个时刻沿条块滑面的孔隙水压力分布情况见图 12,其中的 32 个条块所对应的孔隙水压力代表图 11 中最危险滑坡面的 32 个绿色条块底部中点的孔隙水压力.可见雨停时各条块滑面孔隙水压力较高,雨后各条块滑面孔隙水压力均有所降低,说明雨后边坡浅层水分下渗导致最危险滑面所在的边坡浅层区域含水量出现整体下降.将这两个时刻沿滑面条块的孔隙水

压力数据分别输出到 Excel 中求和,得其总和分别为 -277.450 kPa 和 -411.467 kPa,32 个条块的平均孔隙水压力分别为 -8.670 kPa 和 -12.858 kPa,第 10 天条块的平均孔隙水压力与第 8 天相比降低 4.188 kPa,降低率为 48.3%.由于雨后最危险滑面上的孔隙水压力降低幅度较大,因此稳定性系数明显增大.由图 11 可知,计算所得最危险滑面均为圆弧形,而碎石土多为浅表层直线型滑坡,这是由于极限平衡法在搜索最危险滑面时默认滑面为圆弧形,且本排土场典型滑坡滑面呈不规则圆弧形,表明圆弧形最危险滑面的破坏模式是基本适用于本排土场的.

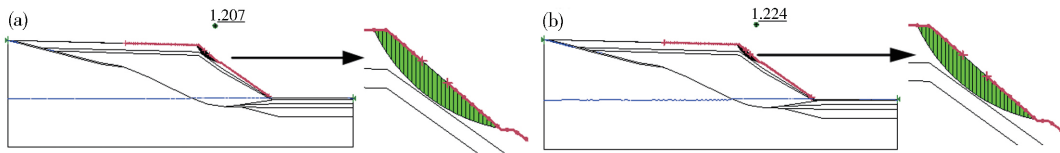


图 11 不同时刻的最小稳定性系数及滑面. (a) 第 8 天; (b) 第 10 天

Fig. 11 Minimum stability coefficient and slip surfaces at different moments: (a) the 8th day; (b) the 10th day

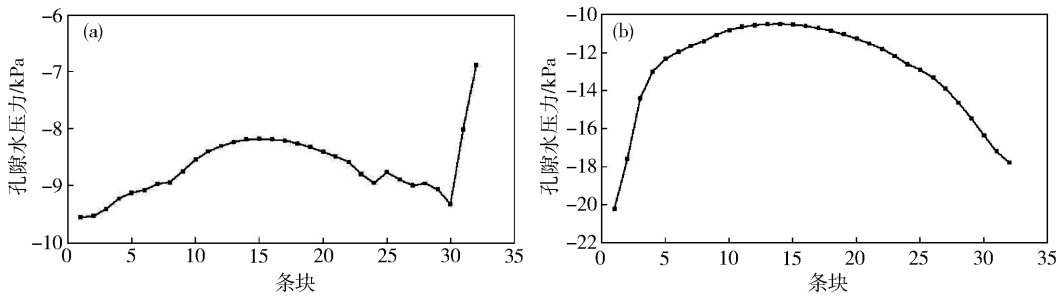


图 12 不同时刻沿滑面条块的孔隙水压力分布. (a) 第 8 天; (b) 第 10 天

Fig. 12 Pore-water pressure distribution along the slip surface at different moments: (a) the 8th day; (b) the 10th day

3 结论

(1) 通过边坡表层土体天然含水率和天然重度求出天然体积含水量,再查土-水特征曲线得到土体相应的基质吸力,将其作为计算剖面最大基质吸力,结合地下水位以上土体基质吸力分布的一般规律,可以快速地近似确定计算剖面初始孔隙水压力分布.

(2) 降雨时排土场层状碎石土边坡会在透水性最强的边坡浅层形成集中渗流通道,当坡底存在弱透水性土层时会切断渗流通道,导致汇集到坡底的雨水从坡脚涌出.

(3) 排土场边坡位移在持续暴雨初期增加最快,之后增加速度趋缓,降雨结束以后,最大位移即开始缓慢减小.排土场层状碎石土边坡各层土体中,浅层土体抗剪强度最低,孔隙最多,降雨时基质吸力降低速度最快,排土场剪应变主要集中在边坡浅层,主要发生浅层滑坡.

(4) 持续暴雨条件下,排土场边坡稳定性系数在

降雨初期会随着浅层碎石土基质吸力的减小而快速下降,随着降雨的持续,边坡浅层进入稳定渗流状态以后,稳定性系数会基本保持不变,直到降雨停止,稳定性系数才会开始缓慢增大.排土场层状碎石土边坡浅层滑坡在持续暴雨作用下容易在降雨中后期发生.

参 考 文 献

[1] Li J. *Stability Analysis of Gravel Slope Subjected to Rain Infiltration* [Dissertation]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014
(李静. 降雨入渗条件下碎石土边坡稳定性分析[学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2014)

[2] Ning W H, Ning J, Yu M H, et al. Influence of rainfall on gravelly soil slope stability. *Water Resour Power*, 2011, 29(1): 83
(宁万辉, 宁健, 俞美华, 等. 降雨对碎石土边坡稳定性的影响分析. 水电能源科学, 2011, 29(1): 83)

[3] Kong Y F, Song E X, Yang J, et al. Rainfall's effect on the stability of unsaturated slopes. *J Civ Archit Environ Eng*, 2013, 35(6): 16

- (孔郁斐, 宋二祥, 杨军, 等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性的影响. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(6): 16)
- [4] Fourie A B, Rowe D, Blight G E. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. *Geotechnique*, 1999, 49(1): 1
- [5] Gavin K, Xue J F. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes. *Comput Geotech*, 2008, 35(2): 223
- [6] Ren J L. *Study on the Stability of Cutting Slope Influenced by the Rainfall Condition Base on the Unsaturated Seepage Theory* [Dissertation]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008
(任金来. 基于非饱和渗流理论的不同降雨条件下路堑边坡稳定性研究[学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2008)
- [7] Egeili I, Pulat H F. Mechanism and modeling of shallow soil slope stability during high intensity and short duration rainfall. *Sci Iran*, 2011, 18(6): 1179
- [8] Zeng L, Fu H Y, He Z M, et al. Impact of rainfall on stability of granular soil embankment slope considering saturated-unsaturated seepage. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2014, 45(10): 3614
(曾铃, 付宏渊, 何忠明, 等. 饱和-非饱和渗流条件下降雨对粗粒土路堤边坡稳定性的影响. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3614)
- [9] Jiang Z M, Zeng L, Fu H Y, et al. Seepage characteristics of thick coating slope in raining condition. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2012, 43(7): 2782
(蒋中明, 曾铃, 付宏渊, 等. 降雨条件下厚覆盖层边坡的渗流特性. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2782)
- [10] Gasmol J M, Rahardjo H, Leong E C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope. *Comput Geotech*, 2000, 26(2): 145
- [11] Yang C, Sheng D C, Carter J P. Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils. *Comput Geotech*, 2012, 41(5): 36
- [12] Chen X B, Xu W G, Liu X P. Effect of rainfall infiltration on additional settlement and stability debasement of granular soil fillings embankment. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2011, 42(3): 765
(陈晓斌, 徐望国, 刘小平. 降雨入渗对粗粒土路堤变形与稳定性的影响. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 765)
- [13] Wang X T, Huang J, Wu J C. Stability evolution of debris landslides under rainfall. *China Earthquake Eng J*, 2014, 36(1): 54
(汪旭涛, 黄江, 吴建超. 降雨作用下碎石土滑坡稳定性演化过程分析. 地震工程学报, 2014, 36(1): 54)
- [14] Liu X R, Zhang L, Yu Y, et al. Research on sliding mechanism of Dahan slope in Youyang county under rainfall condition. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(10): 2898
(刘新荣, 张梁, 余瑜, 等. 降雨条件下酉阳大涵边坡滑动机制研究. 岩土力学, 2013, 34(10): 2898)
- [15] Yang Z G. *Impact of Rainfall on Stability of Soil Slope* [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2007
(杨志刚. 降雨入渗条件下土质边坡稳定性分析[学位论文]. 南京: 河海大学, 2007)
- [16] Zhou Y X. *Numerical Simulation of Groundwater Flow for Slope Fractured Rocks and Waste Dump of Mine* [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2005
(周玉新. 矿山边坡裂隙岩体和排土场地下水数值模拟研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2005)