

考虑前期降雨的边坡稳定降雨阈值曲面

杨 攀, 杨 军

(清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 在经验性降雨阈值和边坡稳定性数值分析两大类研究的基础上, 考虑了降雨入渗和非饱和土性质, 使用岩土有限元软件 Plaxis 高级模式对滑坡预警降雨阈值进行研究分析。算例表明, 将降雨量在降雨时间范围内分成 2 段后, 得到的边坡稳定性变化与实际情况更接近, 重新定义前期降雨为在给定初始条件下引起边坡最危险滑裂面到坡面之间土体吸力分布发生变化的降雨。前期降雨时长与潜在滑裂面最大深度成正比, 与饱和渗透系数成反比。将前期降雨量引入到降雨强度—持时曲线中作为第三个空间坐标轴, 将该曲线拓展为前期降雨量—降雨强度—持时曲面。通过一基岩型边坡算例展示了阈值曲面的建立方法, 并通过与模型试验数据的对比验证了其可靠性。

关 键 词: 降雨阈值; 力学模型; 非饱和土边坡; 前期降雨; 滑坡预警

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598—(2015) 增 1—0169—06

Rainfall threshold surface for slopes stability considering antecedent rainfall

YANG Pan, YANG Jun

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the research of empirical rainfall threshold and numerical analysis, the landslide early warning rainfall threshold was calculated with advanced model of FEM code Plaxis, considering the rainfall infiltration and the characteristics of unsaturated soil. The influence of rainfall distribution mode was firstly studied. The results show that separating rainfall into two phases is better than one averaged phase in slope stability calculation. Then, the antecedent rainfall is redefined with explicit physical significance as the rainfall causes the change of matric suction of the unsaturated soil within the slope surface and the potential slip surface. And the antecedent rainfall duration is directly proportional to maximum depth of potential slip surface and inversely proportional to the saturated permeability coefficient of the soil. The two parameters in the expression of the duration are investigated and the suggested values are given. Lastly, the amount of antecedent rainfall is introduced to the I - D curve as the third coordinate axis to develop A - I - D rainfall threshold surface. A case study of slope on bed rock is carried out to demonstrate the process for establishing this space curve, which is compared with the test data. This verification proves the reliability of the method proposed.

Keywords: rainfall threshold; mechanical model; unsaturated soil slope; antecedent rainfall; landslide early warning

1 引 言

降雨是诱发滑坡灾害的主要因素之一, 其对边坡稳定性的影响成为近些年来学者关注的热点问题。目前在这方面的研究主要分为两类, 一类是根据历史上诱发滑坡的降雨数据建立经验性降雨阈值, 作为滑坡预警的依据; 另一类是通过试验方法或数值方法研究降雨对边坡稳定性的影响规律, 为滑坡综合预警提供参考。

诱发滑坡的降雨阈值是指诱发滑坡的降雨表征参数的最小值或最大值, 当降雨表征参数低于最小值时滑坡不会发生; 当降雨表征参数高于最大值时滑坡一定会发生; 当降雨表征参数介于最小值和最大值时滑坡有可能会发生。所以, 降雨阈值是概率意义上的概念, 只有当最大值等于或近似等于最小值时, 降雨阈值才能表现出临界意义。

经验性降雨阈值的概念提出较早, Cane^[1]整理了 73 个降雨诱发的浅层滑坡和泥石流案例, 选择降

雨持时和平均降雨强度作为降雨的表征参量,并将案例中诱发滑坡的降雨数据在对数坐标系中绘制成散点图。Cane 认为,散点图下包络线可以作为滑坡预警的降雨阈值,用于对未来浅层滑坡的预警。降雨持时的引入,使降雨阈值从状态概念拓展为过程概念,提高了预警的合理性。降雨强度即时型式的降雨阈值(即 I - D 阈值曲线)后来得到广泛应用。

然而,降雨强度-持时型式的经验性降雨阈值仍然存在理论缺陷,如预警准确性受历史数据完整性影响较大、阈值过低导致预警效率较低、在缺乏统计数据的地区难以推广等。近些年来国内外学者在经验性降雨阈值的建立方法上进行了多方面的改进,取得了丰富的研究成果,改进包括(1)缩小研究区域,建立区域或局部降雨阈值^[2-3]。(2)对刻画降雨表征的参量进行标准化,通过标准化的方法反映边坡对常规降雨的适应能力^[3-4]。(3)引入累积降雨量、前期降雨量等参量,对降雨表征进行更全面的描述。(4)改进统计方法,采用贝叶斯法或频数法等确定降雨阈值曲线^[5]等等。

除经验性降雨阈值外,降雨对边坡稳定性影响规律的试验研究和数值研究也取得了大量成果。吴宏伟^[6]用有限元程序 SEEP/W 对雨水入渗对非饱和土边坡稳定性影响进行参数研究。徐晗等^[7]在 ABAQUS 中编写用户子程序 USDFLD,引入 Mohr-Coulomb 型式的 Fredlund 双变量强度准则,进行了降雨入渗条件下非饱和土边坡渗流场和应力场的耦合分析。于玉贞等^[8]通过稳态与非稳态渗流条件下的非饱和土堤算例,讨论了 Bishop 和 Fredlund 两种抗剪强度公式应用于强度折减有限元法的差异,并与极限平衡法进行对比。Rahimi 等^[9]结合新加坡的地质条件和降雨统计,将前期降雨分为延迟型、标准型、前置型,研究了不同型式的前期降雨对不同渗透性边坡稳定性的影响。数值方法如今已成为研究降雨对非饱和土边坡影响的有效手段。

本文将上述两类研究进行结合,通过数值方法建立特定非饱和土边坡滑坡预警降雨阈值,并对降雨阈值型式进行改进,以达到更好的预警效果。

2 I - D 阈值曲线的改进

降雨强度和持时是直接的气象监测量,以此作为预警指标符合人们的直观感受,因此 I - D 阈值曲线得到了广泛应用。不过 I - D 曲线仍不完备: I - D 曲线横坐标表示的是平均降雨强度,不能反映不同降雨型式的差别,然而事实证明, I - D 阈值曲线确实有其预警功效。导致这种矛盾的原因在于不同降

雨型式对边坡稳定性影响的差别未被量化。本节使用岩土有限元软件 Plaxis 对一个单体边坡在不同型式降雨影响下的稳定性发展进行计算,尝试对这个问题进行解释,并提出 I - D 曲线的改进办法。

2.1 建立验证算例模型

验证算例模型中,单一土层边坡坡高 12 m,坡度为 1:1,不考虑地下水的影响。为避免边界的影响,模型在坡顶和坡底进行了一定范围的延长。模型参数如图 1 所示。

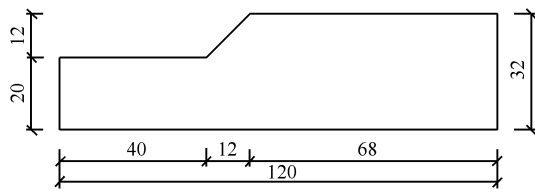


图 1 验证算例边坡模型尺寸参数(单位: m)
Fig.1 Size parameters of model slope(unit: m)

算例为平面应变模型,侧边界约束水平位移、底边界约束水平和竖向位移。水力边界条件:侧边界为不透水边界;底边界为 $h=0$ m 的定水头边界,模拟地下水位;顶边界为流量边界,模拟降雨入渗情况。在实际降雨过程中,当降雨强度超过边坡的渗透能力时坡面会产生地表径流,Plaxis 通过随时调整顶部边界条件来模拟这种情况:当压力水头未超过预设的最大地表水深度时,顶边界保持为流量边界;当压力水头超过最大地表水深度时,顶部边界被替换为定水头边界,以表示超出最大地表水深以外的降雨将形成地表径流,此时的水头为边界点位置水头与最大地表水深度之和。本文统一假设最大地表水深度 $\Delta_{\max} = 0.001$ m。

计算单元采用 15 节点三角形单元,岩土力学参数和渗透性参数见表 1、2。表中, γ_{unsat} 为非饱和重度; γ_{sat} 为饱和重度; E' 为弹性模量; ν' 为泊松比; c' 为黏聚力; ϕ' 为内摩擦角; ψ 为膨胀角; S_{residu} 、 S_{sat} 分别为残余饱和度和最大饱和度; g_n 、 g_a 、 g_l 为经验系数; k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 向渗透系数。

表 1 岩土材料力学参数
Table 1 Mechanical parameters of soil

材料类型	γ_{unsat} /(kN/m ³)	γ_{sat} /(kN/m ³)	E' /(kN/m ²)	ν'	c' /kPa	ϕ' /(°)	ψ /(°)
摩尔-库仑	16	18	21 480	0.3	12	26	0

表 2 岩土材料渗透性参数
Table 2 Permeability parameters of soil

渗流模型	S_{residu}	S_{sat}	g_n	g_a /(1/m)	g_l	k_x /(m/d)	k_y /(m/d)
Van Genuchten	0.231 7	1	1.13	1.9	0.5	0.623 8	0.623 8

边坡土体内基质吸力分布有很大的随机性，与土的性质、坡面环境、降雨历史等多种因素有关。对于地下水位较深、长时间未受降雨影响的边坡，目前通常假设地下水位以上土体基质吸力呈线性增加，达到吸力上限（试验结果表明自然状态土基质吸力存在上限值）后保持常数^[10]，在 Plaxis 中对均匀土体进行一维稳态渗流计算也可以得到类似的结论。在验证算例中，假设边坡内基质吸力上限为 30 kPa，并通过给定微小降雨量形成稳态渗流以达到此上限值。将该稳态渗流的吸力分布作为降雨影响边坡稳定性分析的初始状态，其吸力分布如图 2 所示。

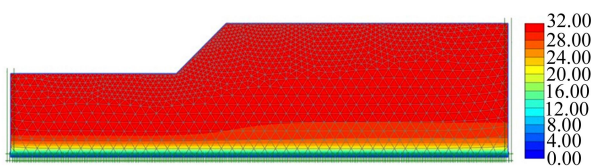


图 2 验证算例边坡初始基质吸力分布(单位: kPa)

Fig.2 Initial distribution of matrix suction in model slope (unit: kPa)

2.2 全局平均与实际降雨的影响比较

全局平均是指不考虑降雨时段内降雨强度的分布情况将不同型式的降雨简化为均匀型降雨。均匀型降雨与实际降雨情况相比，降雨总量和持时均相同。 $I-D$ 曲线采用的就是全局平均的概念，本节通过算例对这种简化方法的可靠性进行验证。

实际降雨情况非常复杂，难以逐一讨论。本节将实际降雨理想化为直线型、正弦型、余弦型和圆弧型来表示降雨强度-时间特征。上述降雨型式可以进一步分为递增和递减两种情况，加上平均型降雨，本节所采用的降雨型式总计有 9 种。假设降雨持时为 10 d，降雨总量为 550 mm。

在确定初始条件、边界条件及降雨型式后，本文使用 Plaxis 高级模式进行不同降雨型式下的边坡稳定流固耦合分析，采用强度折减法(ϕ - c 折减法)计算边坡安全系数，通过比较降雨结束时的边坡安全系数来衡量不同降雨型式对边坡稳定性影响。计算得到的边坡安全系数见表 3。

偏差按式 (1) 计算：

$$\text{偏差} = \left| \frac{F_{sa} - F_{su}}{F_{su} - F_{s0}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

在总降雨量与降雨持时相同的情况下，均匀型降雨与非均匀型降雨对边坡稳定性的影响确实会有差别，与降雨引起的安全系数的下降相比，差别不

表 3 不同型式降雨作用下边坡的安全系数变化

Table 3 Changes of slope safety factors by different rainfall types

降雨类型	初始安全系数 F_{s0}	非均匀型降雨下安全系数 F_{su}	均匀型降雨下安全系数 F_{sa}	偏差 /%
直线式递增	1.423	1.159	1.147	4.3
正弦式递增	1.423	1.158	1.147	4.0
余弦式递增	1.423	1.153	1.147	2.2
圆弧式递增	1.423	1.168	1.147	7.6
直线式递减	1.423	1.153	1.147	2.2
正弦式递减	1.423	1.153	1.147	2.2
余弦式递减	1.423	1.148	1.147	0.4
圆弧式递减	1.423	1.161	1.147	5.1

是很大。除上述算例外，笔者通过改变边坡参数、初始吸力分布、总降雨量、降雨持时、降雨型式（降雨分布更为随机）等参量分析了多个算例以比较均匀型降雨与非均匀型降雨对边坡安全系数的影响，结论类似，即差别存在、但不是很大，在笔者算例中最大 10.2%。这些算例从力学模型的角度解释了 $I-D$ 阈值曲线虽然采用平均降雨强度，却依然能够起到较好的预警效果。

2.3 分段平均对全局平均的改善效果

在评价边坡稳定性过程中平均降雨强度与实际情况相比依然存在偏差，有可能导致降雨阈值在应用中预警失效，本研究的目的是在不导致系统过于复杂的前提下尽可能降低这种偏差。从上述算例的计算结果来看，降雨强度平均化显然是一种简单有效的描述降雨对边坡稳定性影响的方法。如果平均化后的降雨分布更接近实际情况，则从理论上讲，通过平均降雨强度评价边坡稳定性所出现的偏差也会相应减小。因此，一个可以尝试的思路是：将整个降雨过程分为 2 段，对前后两段时间内的降雨分别进行强度平均。对表 3 中偏差较大的两种降雨型式（直线式递增和圆弧式递增）采用这种方法再次进行稳定性分析，结果见表 4。

表 4 分段均匀型对边坡安全系数的改善

Table 4 Improvement of slope safety factors by separated periods averaged rainfall type

分段型式	分段均匀型降雨安全系数 F_{ss}	非均匀型降雨下安全系数 F_{su}	均匀型降雨下安全系数 F_{sa}	改善效果 /%	
直线式递增	2+8	1.154	1.159	1.147	58.3
	4+6	1.154	1.159	1.147	58.3
	6+4	1.158	1.159	1.147	91.7
	8+2	1.156	1.159	1.147	75.0
圆弧式递增	2+8	1.156	1.168	1.147	42.9
	4+6	1.160	1.168	1.147	61.9
	6+4	1.154	1.168	1.147	33.3
	8+2	1.155	1.168	1.147	38.1

改善效果按式 (2) 计算:

$$\text{改善效果} = \left| \frac{F_{ss} - F_{sa}}{F_{su} - F_{sa}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

从表 4 中最右列可以看出, 对非均匀型降雨强度进行分段平均化之后, 降雨作用下的边坡安全系数与均匀型降雨相比, 偏差量有了明显的下降。除上述算例外, 笔者在其他算例中也得到了相同的结论。分段 (分两段) 平均化可以改进平均降雨强度描述降雨对边坡稳定性影响的准确性。这种方法是本文对传统 $I-D$ 降雨阈值曲线进行改进的基础。

3 前期降雨的定义

关于前期降雨, 目前学界较多采用的概念是导致滑坡的强降雨发生前 $D_A d$ 所产生的降雨量; 不同学者对 D_A 的取值不尽相同。该定义暗示, 诱发滑坡的降雨模式为 $D_A d$ 前期降雨+1 d (或数小时) 强降雨。然而实际上诱发滑坡的降雨模式并不固定, 持时较长、强度均匀的降雨同样会引起滑坡。前文算例也表明, 在强度递减型降雨影响下边坡安全系数随降雨也会出现持续下降的现象。

从机制来看, 降雨影响边坡稳定性的原因是降雨会导致边坡内部基质吸力分布的改变, 而降雨诱发滑坡的主要原因是降雨导致边坡滑裂面附近土体吸力降低甚至丧失。在降雨过程中的任意时刻, 该时刻前的降雨入渗所引起的边坡吸力分布的改变, 都会促进该时刻后的降雨入渗, 所以, 前期降雨对边坡稳定性的影响作用实际上与边坡特征有明显的关系, 而目前前期降雨的定义并不能反映这种关系。为弥补当前定义的缺陷, 本文尝试重新定义前期降雨的概念, 以使物理意义更为明确, 即前期降雨是指在给定初始条件下引起边坡最危险滑裂面到坡面之间土体吸力分布发生变化的降雨, 包含以下含义: (1) 前期降雨需要入渗到最危险滑裂面附近; (2) 前期降雨是入渗深度概念, 而不是强度概念, 因而前期降雨之后的降雨不一定强度更大; (3) 前期降雨有可能会直接导致滑坡, 也有可能不导致滑坡, 视其对吸力分布的改变程度。在这样的定义下, 前期降雨持时与多因素有关, 如降雨强度、岩土渗透性、坡度等。由于本文的研究对象为单体边坡, 因此引入与边坡相关的参量, 在这里尝试给出前期降雨持时的定义式:

$$D_A = \frac{\alpha d_s}{\beta k_{sat}} \quad (3)$$

式中: D_A 为前期降雨持时; d_s 为降雨前最危险滑裂

面最大深度 (可通过有限元软件求出, 在降雨过程中最危险滑裂面会有上移的趋势^[8], 需要用系数对其进行修正); k_{sat} 为岩土饱和渗透系数; α 为经验系数, 反映降雨过程中最危险滑裂面的上移; β 也为经验系数, 反映前期降雨平均入渗速度。

算例表明, 当降雨强度较大时最危险滑裂面上移幅度最大可达到约 50%, 这里取 $\alpha = 0.5$ 。对于最危险滑裂面上移幅度较小 (未达到 50%) 的情况, 这种取值也有实际意义: 降雨过程中浸润锋一般平行于坡面, 最危险滑裂面一般为近似圆弧型, 当降雨浸润深度达到降雨前最危险滑裂面最大深度的 50% 时, 实际滑裂面与坡面之间大部分土体已处于浸润状态, 即吸力状态发生改变, 符合前期降雨的意义。图 3 为上述说明的示意图。

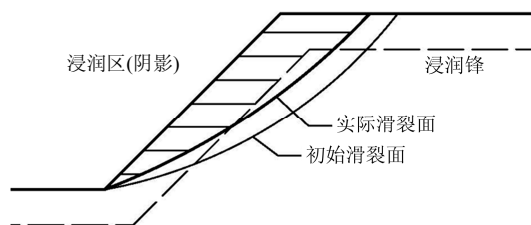


图 3 关于经验系数 $\alpha = 0.5$ 的说明

Fig.3 Explanation of empirical coefficient $\alpha = 0.5$

与上述各参量相比, β 不仅与边坡条件相关, 而且与前期降雨强度有关。一般情况下边坡土体不会达到饱和状态, 雨水在土体中的渗流速度小于其饱和渗透系数。计算过程中可假设 $\beta = 0.1$; 在初始基质吸力不是很大的情况下, β 取值可以增大; 在初始基质吸力很小的情况下, 可以取 $\beta = 1$ 。

有了对前期降雨持时的定义, 则所有降雨过程均可以视为 D_A 时长的前期降雨和剩余时长的第二时段降雨, 分段平均方法的分段时刻也得以明确。在分段平均方法和前期降雨定义的基础上, 本节将建立考虑前期降雨影响的降雨阈值曲面, 以实现对比 $I-D$ 降雨阈值曲线的改进。

4 阈值曲面的建立与验证

4.1 建立与试验相对应的边坡模型

本节针对林鸿州等^[11]基岩型边坡模型试验建立有限元边坡模型和对应的阈值曲面, 通过对比试验数据说明阈值曲面在边坡预警过程中有效性。

基岩型边坡覆土由含水率相等的粉细砂组成, 其力学参数在文献中已直接给出, 见表 5。

表 5 粉细砂力学参数

Table 5 Mechanical parameters of silty-fine sand

材料类型	γ_{unsat} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	E' (kN/m^2)	ν'	c' (kN/m^2)	ϕ' ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)
摩尔-库仑	15	15	21 480	0.3	0	34.3	0

文献[11]测定了粉细砂在不同含水率状态下的基质吸力,并绘制出粉细砂的土-水特征曲线,测定了粉细砂的饱和渗透系数,未测定渗透性函数曲线。为了在 Plaxis 中尽可能准确地模拟粉细砂的渗透性能,本文对试验所测土-水特征数据点利用 Van Genuchten 模型进行拟合,确定模型参数中的 g_n 、 g_a 。另外,参考 Plaxis 内置非饱和土数据库中各种砂的参数,对试验用粉细砂的 g_l 进行赋值,粉细砂渗透性参数见表 6。

表 6 粉细砂渗透性参数

Table 6 Permeability parameters of silty-fine sand

渗流模型	S_{residu}	S_{sat}	g_n	g_a ($1/\text{m}$)	g_l	k_x (m/s)	k_y (m/s)
Van Genuchten	0.07	1	3.800	1.270	1.25	3.32×10^{-5}	3.32×10^{-5}

试验边坡采用含水率相等的土样填筑而成,可以认为边坡初始吸力为均值分布,在此忽略边坡模型制成后到开始进行降雨试验前这段闲置时间内边坡土体吸力分布所发生的变化。初始吸力值大小可以根据土样含水率和土-水特征曲线求得,约为 6 kPa。该边坡初始吸力分布如图 4 所示。

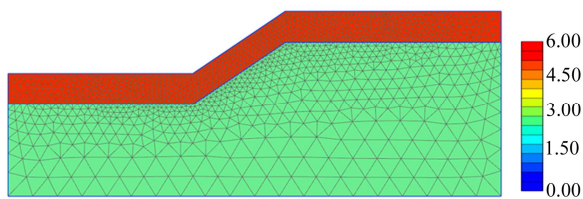


图 4 边坡初始基质吸力分布(单位: kPa)

Fig.4 Initial distribution of matrix suction in model slope (unit: kPa)

4.2 建立考虑前期降雨的降雨阈值曲面

前期降雨的意义在于改变边坡最危险滑裂面到坡面之间土体内部的吸力分布。当前期降雨时长确定后,对于不同前期降雨平均强度得到不同的吸力分布;在此吸力分布基础之上,可以计算不同降雨时长(指第二时段降雨)所对应的导致滑坡的降雨强度。即每一个前期降雨平均强度都对应着一个 I - D 曲线。将前期降雨平均强度用第三个坐标轴进行表示,传统的 I - D 阈值曲线就可以拓展为阈值曲面,从而对边坡稳定性的发展进行更为准确的描述。

上文定义的前期降雨时长是边坡特征参数,对特定边坡为定值,所以给定前期降雨平均强度相当于给定前期降雨总量,上述阈值曲面可称为 A - I - D 型式的降雨阈值曲面,其中 A 为前期降雨总量。

Plaxis 采用强度折减法计算边坡安全系数的同时,其计算最终破坏步骤的增量位移可以反映边坡的破坏形式,即最危险滑裂面的位置见图 5。

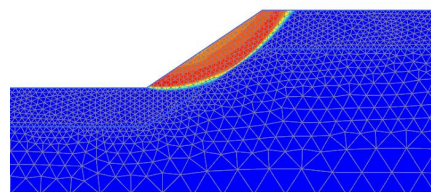


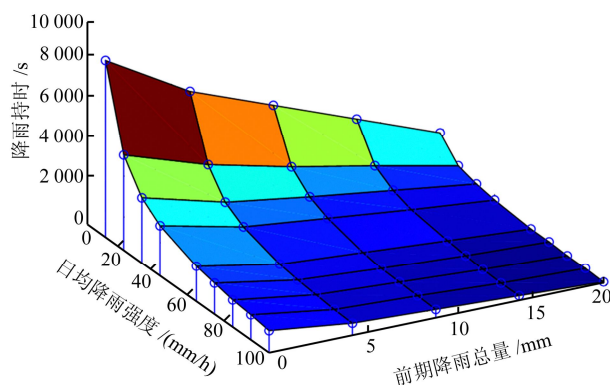
图 5 基岩型边坡初始最危险滑裂面

Fig.5 Critical slip surface of model slope on bed rock

初始危险滑裂面与基岩相切,最大深度为覆土厚度,即 0.41 m。考虑到试验土样饱和度较高,其初始相对渗透系数就达到 0.25,取经验系数 $\beta = 1$ 。则按式(3)计算得该边坡前期降雨时长:

$$D_A = \frac{\alpha d_s}{\beta k_{\text{sat}}} = \frac{0.5 \times 0.41}{1 \times 3.32 \times 10^{-5}} = 6175 \text{ s} = 1.72 \text{ h} \quad (3)$$

对计算值取整,前期降雨时长为 2 h。对前期降雨总量按 5 mm 的间隔进行取值,从 $A_2 = 0 \text{ mm}$ 到 $A_2 = 20 \text{ mm}$ 共 5 组。以前期降雨结束后的应力状态作为新的初始条件,给定不同降雨强度,使用 Plaxis 计算直至边坡发生破坏。边坡破坏时所对应的降雨强度和降雨持时即为边坡在降雨影响下的阈值点,可以得到一簇不同前期降雨量对应的 I - D 曲线。如果把前期降雨量作为第 3 个坐标轴,则二维曲线可拓展为三维曲面,即 A - I - D 阈值曲面。针对该边坡所建立的阈值曲面如图 6 所示。

图 6 A - I - D 降雨阈值曲面Fig.6 A - I - D threshold surface

4.3 阈值曲面与试验数据的对比分析

降雨试验中采用的降雨强度分别为 40 mm/h 和 80 mm/h, 在降雨影响下试验模型发生滑坡的时间点分别为 1 388 s 和 3 270 s。试验中, 降雨一次性完成, 强度保持稳定, 直至边坡发生失稳。所以, 试验数据与阈值曲面的对比, 即为试验数据与 $A_2 = 0$ mm 所对应的 I - D 阈值曲线的对比。对比结果如图 7 所示。从图中可以看出, 滑坡对应的降雨数据点位于曲线上方, 说明使用基于力学模型的降雨阈值曲面进行试验中的滑坡预警是可行的。阈值点对应的安全系数 $F_s = 1.2$ 。土体参数一般都有较大的离散性, 即使试验已经对土样进行筛选, 这种离散性也不能忽略。实际工程中为避免阈值曲面出现漏预警, 阈值点所对应的 $F_s > 1$, 如取 $F_s = 1$, 图 7 中, 阈值曲线将向右移动, 导致试验中 80 mm/h 所对应的数据点位于曲线下方, 发生漏预警。应用本文阈值曲面进行滑坡预警时, 应尽量采用准确的边坡参数, 在确定阈值点的过程中设置合理的安全系数, 方能起到较好的预警效果。

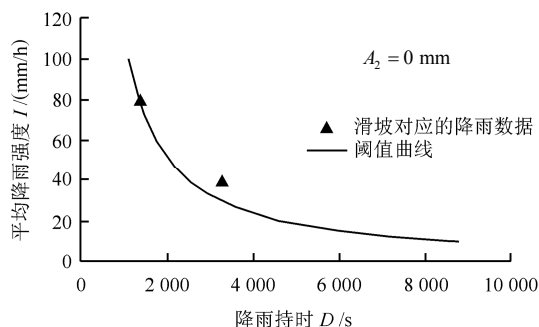


图 7 试验中滑坡对应的降雨数据点与阈值曲线的关系

Fig.7 Relationship between threshold curve and rainfall data corresponding to landslide in experiment

5 结 论

(1) 重新定义了前期降雨, 其物理意义更加明确。在此基础上建立的 A - I - D (前期降雨量-降雨强度-持时阈值曲面) 降雨阈值曲面 (见图 6), 与传统的 I - D 阈值曲线相比, 理论上更加完善, 预警更加准确。

(2) 阈值曲面的可靠度受边坡初始状态和土体参数的准确性影响较大, 建立有效的阈值曲面需要配合以更加完善的前期地勘资料、非饱和土数据库和更系统的规律性总结。

参 考 文 献

[1] CAINE N. The rainfall intensity-duration control of

shallow landslides and debris flows[J]. *Geografiska Annaler A*, 1980, 62(1-2): 23—27.

- [2] MARTELLONI G, SEGONI S, FANTI R, et al. Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale[J]. *Landslides*, 2012, 9(4): 485—495.
- [3] 赵衡, 宋二祥. 诱发区域性滑坡的降雨阈值[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1481—1487.
ZHAO Heng, SONG Er-xiang. Rainfall threshold for regional landslides[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2011, 41(5): 1481—1487.
- [4] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. *Engineering Geology*, 2004, 73(3): 247—265.
- [5] PASUTO A, SILVANO S. Rainfall as a trigger of shallow mass movements: A case study in the Dolomites, Italy[J]. *Environmental Geology*, 1998, 35(2-3): 184—189.
- [6] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1—14.
CHARLES Wang-wai, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 1—14.
- [7] 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): 1957—1962.
XU Han, ZHU Yi-wen, CAI Yuan-qi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1957—1962.
- [8] 于玉贞, 林鸿州, 李荣建, 等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2892—2898.
YU Yu-zhen, LIN Hong-zhou, LI Rong-jian, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under transient seepage flow state[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 2892—2898.
- [9] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 137(5): 483—491.
- [10] 吴俊杰, 王成华, 李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732—736.
WU Jun-jie, WANG Cheng-hua, LI Guang-xin. Influence of matric suction in unsaturated soil on slope stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(5): 732—736.
- [11] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931—1936.
LIN Hong-zhou, LI Guang-xin, YU Yu-zhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1931—1936.