

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0017

马强,李郑森,解家毕,等.黄土边坡失稳的降雨入渗预警阈值[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):152-159. MA Q, LI Z M, XIE J B, et al. Rainfall infiltration threshold for loess slope instability[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 152-159. (in Chinese)

黄土边坡失稳的降雨入渗预警阈值

马强¹, 李郑森², 解家毕¹, 乔楠¹, 张启义¹, 张顺福¹, 刘昌军¹, 郑慧洋²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要:选取陕西省延安市宝塔山地区作为主要研究对象,结合实测数据,利用非饱和土力学有限元计算方法对宝塔山西部边坡进行数值模拟,初步得出宝塔山西部滑体可以诱发坡体滑坡的降雨入渗阈值为24 h累计雨量100 mm。本研究为开展饱和-非饱和黄土边坡在降雨入渗影响下的稳定性分析提供一定的参考。

关键词:延安宝塔山;边坡稳定;Geo-Studio;降雨入渗;模拟分析

中图分类号:TV143;P642 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



我国作为地质灾害频发国家,不论是自然条件诱发的滑坡,还是由人为因素导致的崩塌,都对我国经济建设和人民生命财产造成了重大损失。高大钊^[1]回顾了近代发生的滑坡事件,发现滑坡、泥石流等灾害高发于非饱和土壤区,主要诱因多为连续性降雨或突发性大暴雨。随着降雨的渗入,非饱和土体基质吸力减小,边坡抗剪强度降低,引发滑坡等岩土工程灾害^[2]。黄土在我国分布较为广泛,其滑坡通常规模大、危害强、较难预测^[3],黄土滑坡也是我国西北黄土高原地区最主要的工程地质问题之一^[4],因此开展黄土边坡降雨入渗失稳预警阈值研究具有一定的实际工程意义。

国内外很多学者均开展了黄土边坡崩塌研究^[5]。黄新智等^[6]对兰州市兰山后山南部马兰黄土边坡在不同降雨入渗条件下的稳定性进行了分析,发现黄土边坡安全系数随雨时增长而降低,且非饱和黄土边坡抗剪强度随深度表现为先增加后减小的类似抛物线的关系。周杨等^[7]通过开展在人工降雨条件下黄土边坡的失稳试验,发现在一定的降雨强

度范围内,降雨强度的增大导致黄土边坡入渗速度加快,将导致滑坡产生。潘俊义等^[8]对在不同雨强下的黄土边坡入渗进行测试与分析,发现在不同雨强条件下的黄土边坡入渗深度均呈现坡脚最深、坡顶次之、坡中最浅的规律。邓义龙^[9]基于非饱和渗流理论对降雨入渗下的黄土边坡稳定性进行了分析,发现在降雨强度大于边坡入渗量时,雨水将汇集于坡脚,引起坡脚软化从而引发崩塌。同时,侯鹏飞^[10]利用Midas/GTS有限元分析软件对在不同降雨条件下的黄土边坡稳定性进行了研究,也发现由于降雨强度增大,坡脚处因积水导致边坡的安全系数不断减小。陈文锋等^[11]利用有限元模型对在强降雨条件下高边坡的安全预警问题进行了研究,提出了一种在降雨入渗条件下高边坡稳定性安全预警与失稳判定方法。

经过多年的研究,渗流场变化作为边坡稳定性的一个重要影响因素已经被广泛接受^[12-14]。本文采用延安宝塔山实测资料,应用二维有限元分析软件对宝塔山西部边坡进行模拟研究。针对2013年7

收稿日期:2021-04-08 修回日期:2021-10-15 网络出版时间:2021-10-20

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20211020.0918.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1501202)

作者简介:马强(1987—),男,天津人,高级工程师,主要从事水信息学研究。E-mail:maqiang@iwhr.com

通信作者:解家毕(1975—),男,云南曲靖人,正高级工程师,主要从事岩土工程研究。E-mail:xiejiaibi@iwhr.com

月发生的山体滑坡事件开展模型建模和阈值分析,将定量地揭示降雨入渗量与边坡稳定性的关系,对今后宝塔山地区滑坡防护、加固和抢险预警等工作提供指导与参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

宝塔山位于陕西省延安市,南北长约 320 m,东西宽 30~150 m,最高处约 1 043 m,山体坡度 30°~80°,区域多年平均降雨量约为 500 mm。宝塔山地质层主要为第四系黄土,上更新统黄土最大厚度为 12.5 m,中更新统黄土最大厚度为 63.6 m,黄土平均厚度为 20~30 m^[15]。在自然与人为因素的共同影响下,近年来该地区多发生由于降雨入渗导致斜坡变形引发的小规模土体崩塌,塔体潜在安全风险较高^[16]。在宝塔山西部由多次滑坡后形成的复合滑动面目前面积最大(图 1),东西长 85 m,南北宽 95 m,坡度 45°~50°,老滑体最大厚度约 20 m,总体积 9.4 万 m³。新滑坡由老滑体浅层土再次滑动形成,位于老滑坡中部,坡面呈多级台阶和陡坎,坎高 2~3 m。



图 1 陕西延安宝塔山西部滑坡全貌

Fig. 1 Landslide outline in the south of Baota Mountain, Yan'an, Shanxi Province

1.2 研究数据

为稳定观测降雨入渗引起黄土含水率的变化,选择宝塔山南部的未扰动的自然斜坡体作为含水率及降雨量监测点,共设置了 4 个 TDR 含水率观测井 TJ₁、TJ₂、TJ₃ 和 TJ₄(图 2),单井深度分别为 4.0、8.0、3.0、4.0 m,在各井内不同深度处共安装 TDR 含水率传感器探头 20 个,外接数据采集器。同时,在斜坡表面安装了 1 个自动雨量计。

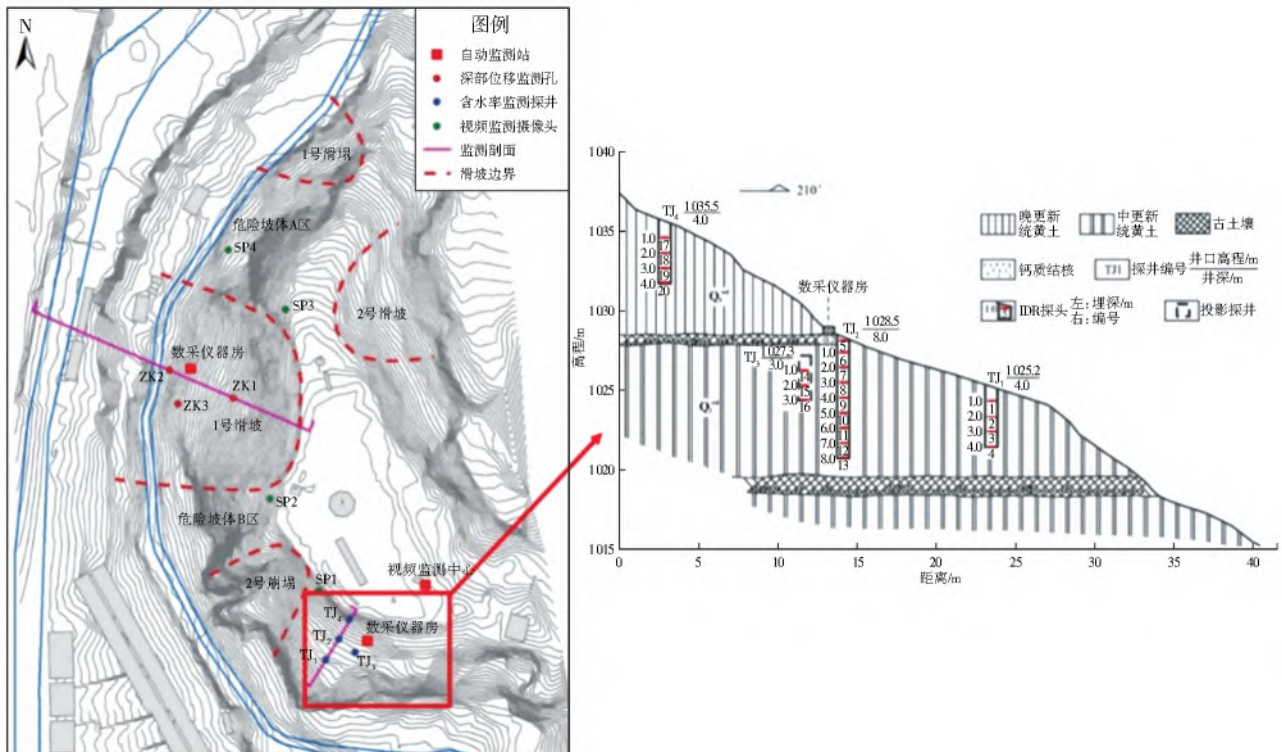
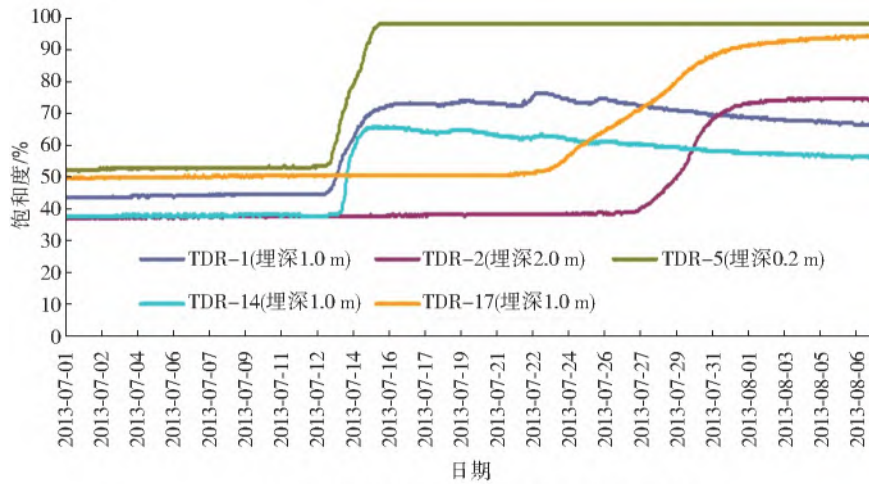


图 2 宝塔山黄土含水率变化监测布置

Fig. 2 Soil water content monitoring of Baota Mountain

黄土含水率在监测剖面方向不仅受黄土质地、容重等自身因素的限制,而且还受降雨、蒸发等外界因素的影响^[17-18]。根据监测数据,降雨量对宝塔山坡面土体含水率的影响随深度的增加逐渐减小,在

暴雨条件下,入渗雨量使斜坡表层土体接近暂态饱和,抗剪强度降低,易发生浅层滑坡和中小型崩塌。例如,2013 年 7 月延安地区极端降雨致使宝塔山坡体表层局部滑塌(图 3)。



(a) 宝塔山滑坡2013年7月土体含水率监测曲线



(b) 宝塔山滑坡2013年7月坡体滑坡

图 3 宝塔山 2013 年 7 月土体监测数据及滑坡情况

Fig. 3 Soil monitoring data and landslide status of Baota Mountain in July 2013

1.3 研究方法

本研究使用 Geo-Studio 软件进行陕西延安宝塔山降雨渗流对边坡稳定性影响研究分析。在该软件内 SEEP/W 模块的模拟渗流场基础上,耦合 Slope/W 模块分析基质吸力和边坡稳定的关系,得出在不同时段、不同情境下的边坡安全系数,进而对宝塔山边坡稳定性进行分析。

1.3.1 渗流计算

渗流计算基于饱和与非饱和土体渗流的二维达西公式,假设在一定时间内流入与流出微元体的水量等于土体单元储水量的变化,总应力不变且孔隙的气压保持为恒定大气压,单位体积含水率的变化与孔隙水压力变化满足关系

$$\partial\theta = m_w \partial u_w \quad (1)$$

式中: u_w 为孔隙水压力, kPa; m_w 为水土特征曲线的斜率, kPa^{-1} ; θ 为单位体积的含水率。总水头 H 定义为

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的容重, kN/m^3 ; y 为高程, m。由于高程保持不变,其对时间的导数为零,则最终用于有限元计算的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

式中: k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 方向的渗流系数, m/s ; Q 为施加的边界流量, s^{-1} ; t 为时间, s 。

1.3.2 边坡稳定性计算

边坡稳定性的计算基于 Fredlund 和 Krahn 提出的极限平衡理论(GLE)开展^[19],建立在两个安全系数(力矩平衡安全系数 F_m 和力平衡安全系数 F_f)

的基础上。安全系数方程组为

$$F_m = \frac{\sum [c' \beta R + (N - u_w \beta) R \tan \phi']}{\sum W_x - \sum N f \pm \sum D d} \quad (4)$$

$$F_f = \frac{\sum [c' \beta \cos \alpha + (N - u_w \beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \alpha}$$

式中: c' 为有效黏聚力, kPa; ϕ' 为有效摩擦角, ($^\circ$); N 为边坡岩土体计算条块 i 的底部法向力, kN/m^2 ; W 为边坡岩土体计算条块 i 的重量, kN/m^2 ; D 为集中荷载, kN/m^2 ; β 、 R 、 x 、 f 、 d 、 ω 为几何参数; α 为边坡岩土体计算条块 i 的底部倾角, ($^\circ$)。

2 模型建模及校准

本次研究首先选择宝塔山南部的未扰动的自然斜坡体进行建模模拟,以实测数据(表 1)对模型进行校准。校准后的参数用于西部由复合滑动面构成边坡的稳定性分析模拟,计算西部边坡的预警阈值。

建模中首先确定土体基质吸力与含水率的关系,参考陕西关中地区黄土基质吸力与含水率关系^[20],去除异质样本,拟合得到关系式为

$$\theta = 12.902 \times s^{-0.036} + 5.488 \times s^{-0.576} \quad (5)$$

式中: s 为基质吸力, kN。

模型中土体基质吸力与渗透系数的关系,参考吴礼州等^[21]对非饱和土渗流及其影响参数的分析成果:

$$k = k_s s_e^{0.5} [1 - (1 - s_e^{\frac{1}{m}})]^2 \quad (6)$$

式中: k 为非饱和土水力传导系数, m/s ; k_s 为饱和土水力传导系数, m/s ; s_e 为有效饱和度。 $m = 1 - 1/n$, n 为经验拟合参数,在本次模拟中取 $n = 4$ 。结合表 1 中其他参数,建立南部边坡模型(图 4)。

表 1 宝塔山南部边坡监测数据

Tab. 1 Geotechnical monitoring data of the south of Baota Mountain

层号	指标	含水率 $w/\%$	密度 $\rho/$ $(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/$ $(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$	垂直渗透系数 $k_y/(cm \cdot s^{-1})$	水平渗透系数 $k_x/(cm \cdot s^{-1})$
TK1-3 中更新统黄土	统计个数	20	20	20	20	20	11	4
	最大值	14.20	1.74	1.58	1.05	39.00	5.20×10^{-4}	4.23×10^{-5}
	最小值	5.70	1.41	1.32	0.72	15.00	6.78×10^{-6}	2.81×10^{-5}
	平均值	8.84	1.56	1.43	0.90	27.45	1.84×10^{-4}	3.41×10^{-5}
	标准差	1.92	0.12	0.10	0.13	8.19	2.18×10^{-4}	7.08×10^{-6}
	变异系数	0.220	0.080	0.070	0.140	0.300	1.190	0.210
TK4 晚更新统黄土	统计个数	4	4	4	4	4	1	1
	最大值	6.60	1.46	1.38	1.02	18.00	3.05×10^{-4}	2.25×10^{-5}
	最小值	6.10	1.42	1.34	0.96	17.00	3.05×10^{-4}	2.25×10^{-5}
	平均值	6.33	1.45	1.36	0.98	17.25	3.05×10^{-4}	2.25×10^{-5}
	标准差	0.21	0.02	0.02		0.03	0.50	
	变异系数	0.033	0.013	0.013		0.027	0.029	

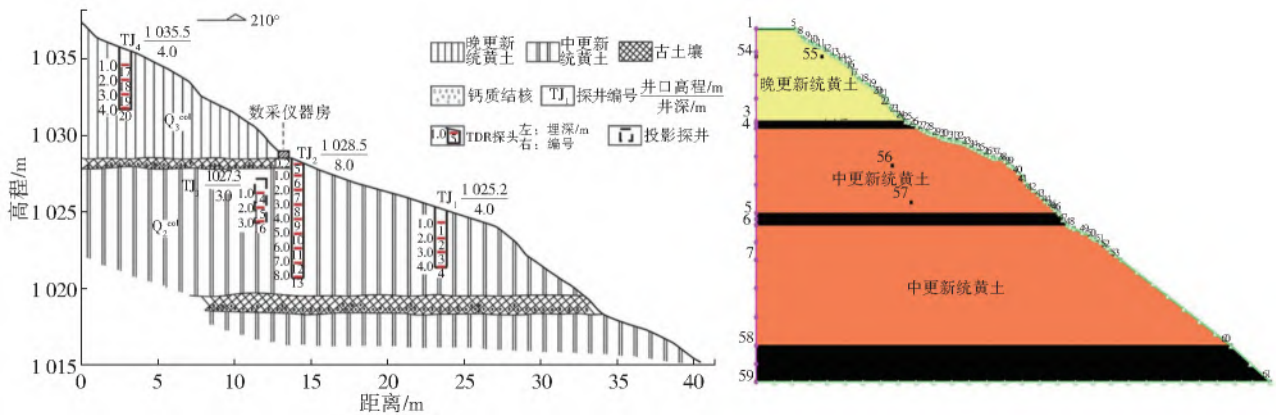


图 4 宝塔山西南部边坡渗流模拟模型

Fig. 4 Seepage simulation of the south slope of Baota Mountain

选取 2013 年 7 月 1 日至 8 月 31 日的降雨数据,对模型进行率定。选取 TDR-10(深埋 5.0 m)及

TDR-2(深埋 2.0 m)观测的土体含水率对模型分别进行率定(图 5)。

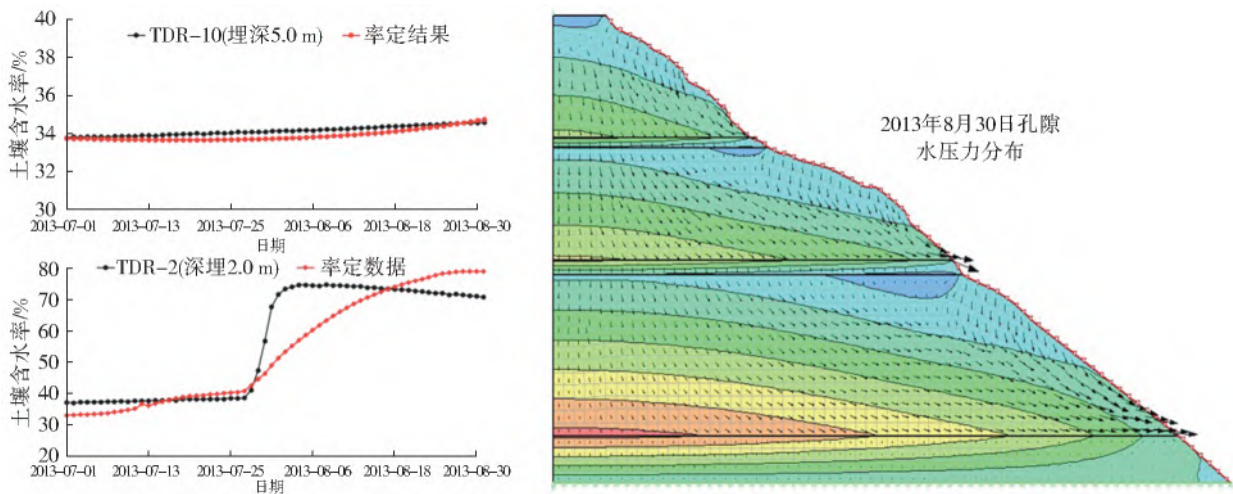


图 5 宝塔山西南部边坡渗流场模拟校正

Fig. 5 Calibration of seepage field of the south slope of Baota Mountain

3 模型模拟分析

3.1 2013 年 7 月滑坡模拟

选取 2013 年 7 月暴雨造成的滑坡事件作为研究对象,结合表 2 参数,首先对宝塔山南部坡面进行

稳定性分析。

在 2013 年 7 月暴雨事件中,西南部边坡最小安全系数为 1.6。边坡基本呈稳定状态,未发生滑坡与崩塌,与实际观测相符,验证率定的参数可以反映宝塔山黄土质地特性。

表 2 宝塔山南部边坡参数

Tab. 2 Parameters obtained from geotechnical tests in the southwest of Baota Mountain

层号	指标	慢剪(S)		三轴(UU)		总应力(CU)		有效(CU)	
		黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)
TK1-3 中 更新统黄土	统计个数	20	20	20	20	10	10	10	10
	最大值	25.00	20.80	15.00	14.60	13.00	12.20	8.00	6.50
	最小值	9.00	11.20	6.00	6.40	7.00	5.70	5.00	3.60
	平均值	14.95	13.87	9.75	8.86	9.70	8.45	6.50	5.21
	标准差	3.68	2.72	2.31	2.44	1.95	1.80	1.08	0.90
	变异系数	0.25	0.20	0.24	0.28	0.20	0.21	0.17	0.17
TK4 上更 新统黄土	统计个数	4	4	4	4	1	1	1	1
	最大值	13.00	13.90	10.00	8.80	11.00	7.60	7.00	5.10
	最小值	10.00	11.30	7.00	6.80	11.00	7.60	7.00	5.10
	平均值	11.75	12.40	8.25	7.75	11.00	7.60	7.00	5.10
	标准差	1.26	1.31	1.26	0.82				
	变异系数	0.11	0.11	0.15	0.11				

利用在南部边坡率定的参数及表 3 中的土工参数建立宝塔山西部边坡模型,对 2013 年 7 月暴雨事件进行模拟,得到结果见图 6。西部边坡在 2013 年 7 月暴雨时间中最小稳定性系数约为 0.727,由于坡

面表层黄土呈暂态饱和状态,基质吸力降低,抗剪强度减小,第一层滑体处于极度不稳定状态,易产生山体滑坡与小部分崩塌,与观测事实相符。

表 3 宝塔山西部边坡参数

Tab. 3 Parameters obtained from geotechnical tests in the west of Baota Mountain

层号	指标	慢剪(S)		三轴(UU)		总应力(CU)		有效(CU)	
		黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ (°)
ZK1-2 第 一层滑体	统计个数	9	9	9	9	3	3	3	3
	最大值	11.00	9.40	8.00	6.90	8.00	6.30	6.00	4.20
	最小值	6.00	6.70	4.00	4.40	6.00	5.20	4.00	3.50
	平均值	8.22	7.89	5.67	5.37	7.00	5.77	5.00	3.87
	标准差	1.64	0.79	1.22	0.86	1.00	0.55	1.00	0.35
	变异系数	0.200	0.100	0.216	0.160	0.143	0.096	0.200	0.091
ZK1-2 第 二层滑体	统计个数	9	9	9	9	3	3	3	3
	最大值	13.00	8.90	9.00	6.70	9.00	5.90	6.00	4.20
	最小值	7.00	6.40	5.00	4.60	6.00	5.20	5.00	3.70
	平均值	9.44	7.71	6.44	5.54	7.33	5.53	5.33	4.00
	标准差	2.30	0.84	1.42	0.74	1.53	0.35	0.58	0.26
	变异系数	0.243	0.109	0.221	0.133	0.208	0.063	0.108	0.066
滑体下部 中更新统 黄土	统计个数	6	6	6	6	4	4	4	4
	最大值	12.00	9.20	9.00	6.30	9.00	6.10	6.00	4.60
	最小值	9.00	7.90	7.00	5.30	7.00	5.30	5.00	3.60
	平均值	10.50	8.73	7.67	5.83	8.00	5.63	5.50	4.18
	标准差	1.049	0.489	0.816	0.489	0.816	0.340	0.577	0.435
	变异系数	0.100	0.056	0.106	0.084	0.102	0.061	0.105	0.104

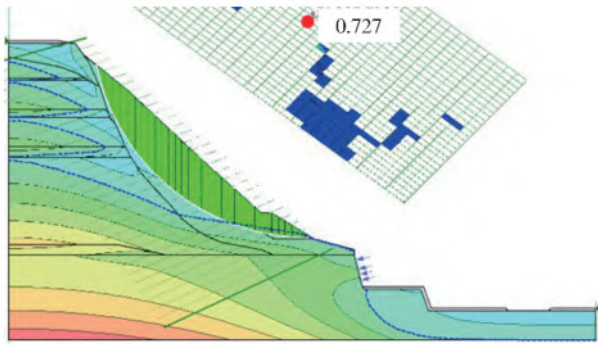


图6 宝塔山西部 2013 年 7 月孔隙水压力分布及安全系数

Fig. 6 Pore-water pressure and FOS of Baota Mountain in the event of July 2013

3.2 阈值分析

分别在不同降雨情景下(表 4、表 5)对宝塔山西

部边坡的稳定性进行分析模拟,得出导致宝塔山西西部边坡小规模崩塌的降雨预警阈值。

根据不同入渗雨量模拟计算边坡稳定系数,结果见图 7。随着雨量的增加,宝塔山西西部边坡稳定系数呈下降趋势。在 24 h 降雨量超过 100 mm 后,边坡安全系数呈突变式降低。综合比较“总应力”“慢剪”“三轴”和“有效”4 套参数特性,三轴试验可以严格控制排水条件,并能通过两侧试样的孔隙水压力求得土体的有效应力强度指标,因此在实际工程中对黏性土的抗剪强度指标通常采用“三轴”试验参数^[22]。综合对比不同参数模拟结果,宝塔山边坡稳定降雨阈值主要参考“三轴”模拟试验参数,确定为 24 h 累计降雨量 100 mm。

表 4 不同设计降雨情景条件
Tab. 4 Design of different rainfall scenarios

模拟情景	设计雨时	设计雨强/(mm · d ⁻¹)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
连续日降水	24 h	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	1 h	10	20	30	40	50					
	2 h	10	20	30	40	50					
连续高强度小时降水	3 h	10	20	30	40	50					
	4 h	10	20	30	40	50					
	5 h	10	20	30	40	50					
	6 h	10	20	30	40	50					

表 5 不同历史降雨情景条件
Tab. 5 Different recorded rainfall scenarios

模拟情景	降雨时段	总雨量/mm	峰值雨量/(mm · h ⁻¹)	模拟时长/h	降水总时长/h	平均雨强/(mm · h ⁻¹)
实际历史降水事件	2012-07-05—2012-07-08	28.0	2.52	96	66	0.42
	2012-07-19—2012-07-21	45.5	3.86	72	46	0.99
实际历史降水事件	2013-07-07—2013-07-08	96.7	9.64	48	46	2.10
	2013-07-07—2013-07-12	254.0	9.64	144	132	1.92
	2013-07-21—2013-07-24	151.9	8.96	96	66	2.30
	2013-09-21—2013-09-22	45.7	3.09	72	48	0.95

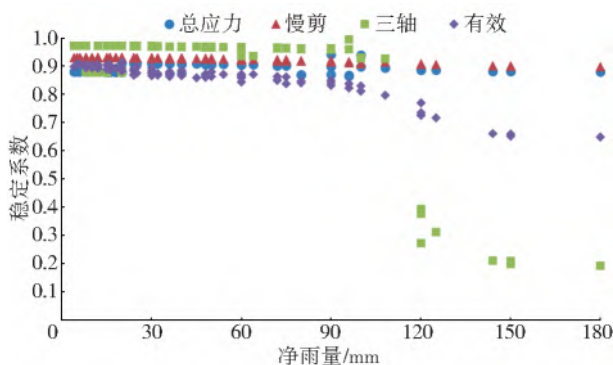


图 7 不同参数条件下入渗雨量与边坡稳定性关系

Fig. 7 Relationship between rainfall infiltration and slope stability

4 结论

基于模型模拟结果,认为宝塔山基底整体稳定,发生整体滑动并产生大型崩塌的可能性较小,但宝塔山西西部坡面崩滑灾害隐患依然存在。在极端气候条件下,当 24 h 累计雨量超过 100 mm 时,坡面表层黄土呈暂态饱和状态,坡面易产生中小型崩塌,危及宝塔山安全。初步建议设定 24 h 累计雨量 100 mm 作为宝塔山黄土边坡预警阈值,并采取相关措施,从如何防止坡面冲刷、降低坡面降雨入渗的角度对宝塔山危险坡面进行综合治理,并结合模拟

结果,建立基于实时雨量监测的预警系统,做好灾害防治工作。

参考文献(References):

- [1] 高大钊. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京:人民交通出版社,2001. (GAO D Z. A review and prospect of geotechnical engineering[M]. Beijing:China Communications Publishing & Media Management Co., Ltd, 2001. (in Chinese)).
- [2] TSAPARAS I, RAHARDJO H, TOLL D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 1-27. DOI: 10.1016/S0266-352X(01)00019-2
- [3] 张真. 陕北黄土边坡降雨入渗现场试验及其灾害预警[D]. 西安:西安理工大学,2018. (ZHANG Z. Field test of rainfall infiltration of loess slopes and its disaster warning in northern Shaanxi Province[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2018. (in Chinese)).
- [4] 王波波. 降雨型浅层黄土滑坡的形成过程研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2018. (WANG B B. Process of rainstorm-triggered shallow loess landslides [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power,2018. (in Chinese)).
- [5] 胡星星. 基于突变理论的黄土崩塌研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2020. (HU X X. Research of loess collapse based on catastrophe theory[D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University,2020. (in Chinese)).
- [6] 黄新智,刘俊俊. 基于 SEEP/W 的降雨条件下黄土边坡稳定性分析[J]. 铁道勘察,2015,41(5):41-44. (HUANG X Z, LIU J J. Analysis of loess slope stability under rainfall conditions based on the SEEP/W[J]. Railway Investigation and Surveying, 2015, 41(5): 41-44. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7479.2015.05.014.
- [7] 周杨,刘果果,白兰英,等. 降雨诱发黄土边坡失稳室内试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(6):838-843. (ZHOU Y, LIU G G, BAI L Y, et al. Model test study of loess slope instability induced by rainfall [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(6): 838-843. (in Chinese)). DOI: 10.14188/j.1671-8844.2016-06-007.
- [8] 潘俊义,侯大勇,李荣建,等. 不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J]. 工程地质学报,2018,26(5):1170-1177. (PAN J Y, HOU D Y, LI R J, et al. Rainfall infiltration test and analysis of loess slope under different rainfall intensities [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1170-1177. (in Chinese)). DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2018042.
- [9] 邓义龙. 基于非饱和土渗流理论的降雨入渗黄土边坡稳定性分析[J]. 中国勘察设计,2020(9):106-108. (DENG Y L. Stability analysis of rainfall infiltration loess slope based on unsaturated soil seepage theory [J]. China Engineering & Consulting, 2020(9): 106-108. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; KCSJ. 0. 2020-09-035.
- [10] 侯鹏飞. 降雨入渗条件下非饱和黄土边坡稳定性分析[J]. 山东交通科技,2020(4):12-14. (HOU P F. Study on the stability of an unsaturated loess slope under the condition of rainfall infiltration [J]. Shandong Transportation Technology, 2020(4): 12-14. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; JTKE. 0. 2020-04-004.
- [11] 陈文锋,张超,姚琴. 降雨条件下非饱和土高边坡预警与失稳判据[J]. 山西建筑,2021,47(7):86-88,93. (CHEN W F, ZHANG C, YAO Q. Safety early warning and instability criterion for high slope of unsaturated soil under rainfall infiltration [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(7): 86-88, 93. (in Chinese)) DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2021.07.031.
- [12] 刘礼领,殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学,2008,29(4):1061-1066. (LIU L L, YIN K L. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1061-1066. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.04.039.
- [13] 姚海林,郑少河,陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2001(5):606-609. (YAO H L, ZHENG S H, CHEN S Y. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(5): 606-609. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2001.05.019.
- [14] 姚海林,郑少河,李文斌,等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002(7):1034-1039. (YAO H L, ZHENG S H, LI W B, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(7): 1034-1039. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2002.07.019.
- [15] 张茂省,校培喜,魏兴丽,等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M]. 北京:地质出版社,2008. (ZHANG M S, XIAO P X, WEI X L, et al. Landslide collapse geological disasters in Baota District of Yan'an [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2008. (in Chinese)).
- [16] 薛强,唐亚明,孙萍萍,等. 降雨入渗对黄土斜坡土体

- 含水率时空分布特性的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 53-56. (XUE Q, TANG Y M, SUN P P, et al. Temporal-spatial distribution of soil water content in loess slope subjected to rainfall infiltration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(2): 53-56. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STTB. 0. 2014-02-012.
- [17] 王云强, 张兴昌. 黄土区小尺度坡面土壤含水率时空变异性研究[J]. 水土保持学报, 2008(2): 32-37. (WANG Y Q, ZHANG X C. Temporal-spatial variability of slope soil moisture at small scale on loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008(2): 32-37. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; TRQS. 0. 2008-02-007.
- [18] 韦杰, 曹雪山, 袁俊平. 降雨/蒸发对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(4): 8-13. (WEI J, CAO X S, YUAN J P. Influences of precipitation and evaporation on the stability of expansive soil slopes[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(4): 8-13. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; GCKC. 0. 2010-04-004.
- [19] FREDLUND DG, KRAHN J, PUF AHL DE, et al. The relationship between limit equilibrium slope stability methods[C]. Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981.
- [20] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土含水量与基质吸力的关系[J]. 水土保持通报, 1995, 15(4): 39-42. (DANG J Q, LI J. Study on correlation between water content and matrix suction of unsaturated loess[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(4): 39-42. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STTB. 0. 1995-04-007.
- [21] 吴礼舟, 黄润秋. 非饱和土渗流及其参数影响的数值分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 94-98. (WU L Z, HUANG R Q. A numerical analysis of the infiltration and parameter effects in unsaturated soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 94-98. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2011. 01. 017.
- [22] 孙莉萍, 杨玉春, 刘梨. 土工直接剪切试验和三轴剪切试验优缺点及适用范围[J]. 水利水电工程设计, 2013, 32(4): 40-42, 47. (SUN L L, YANG Y C, LIU S. The advantages, disadvantages and application scope of direct shear test and triaxial shear test of soil [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 40-42, 47. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-6980. 2013. 04. 014.

Rainfall infiltration threshold for loess slope instability

MA Qiang¹, LI Zhengmiao², XIE Jiabi¹, QIAO Nan¹, ZHANG Qiyi¹, ZHANG Shunfu¹, LIU Changjun¹, ZHENG Huiyang²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd, Tianjin 300222, China)

Abstract: With the growth of the infiltrated water amount, the loess matrix suction will decrease, and lead to the reduction of slope shearing strength that lets the slope under an unstable condition and prone to occur landslides or other geotechnical disasters. The variation of the seepage field as one of the important influence factors of slope stability has been widely agreed with the majority of geotechnical scholars. However, most of the simulation analyses were limited to experimental or hypothetical simulation due to the lack of real monitoring data.

According to the measurement of loess property in both southern and western slopes, the Geo-Studio software was selected to study and analyze the impact of rainfall seepage on loess slope stability in Baota Mountain. Based on four kinds of geotechnical data ("slow shear", "triaxial", "effective", and "total stress"), the stability of the western slope of Baota Mountain was analyzed and simulated under different rainfall scenarios.

By comprehensively comparing the results simulated by four kinds of loess parameters, the influence of rainfall infiltration on slope stability was relatively lower with "total stress" and "slow shear" parameters. When the rainfall over 100 mm in 24 h, the slope stability decreased abruptly under the condition of "triaxial" and "effective". The "triaxial" test can strictly control the drainage conditions and can obtain the effective shear strength indexes of the soil through the pore water pressure. The base of Baota Mountain is generally stable, and the possibility of having large landslides is relatively lower.

However, the potential risk of slope collapse disaster still existed on the Baota Mountain. Under extreme climatic conditions, where the accumulated rainfall exceeded 100 mm in 24 h, the surface loess on the slope will be supersaturated, and then prone to have small/medium-scaled collapse. It is recommended to take relevant measures to manage the risk slope of Baota Mountain from the perspective of how to prevent slope erosion and reduce rainfall infiltration on the slope. In addition, combined with the simulation results, a reservation system based on real-time rainfall monitoring should be established to properly carry out disaster prevention.

Key words: Baota Mountain; slope stability; Geo-Studio; rainfall infiltration; simulation analysis