

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.04.02

甘肃永靖黑方台斜坡稳定的灌溉塬边距探讨

王庆涛¹, 吴文博², 薛 茜³

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 中国能源建设集团西北电力建设工程有限公司, 陕西 西安 710032; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 黑方台地区引水灌溉引发一系列滑坡灾害, 基于塬区灌溉边界距塬边的距离的定义, 界定了“灌溉塬边距”的概念。利用 GEOSTUDIO 软件建立了斜坡水文地质模型和数学模型, 在此基础上研究了灌溉塬边距模型对地下水的分布规律影响; 分析了灌溉塬边距与斜坡稳定性关系; 基于灌溉塬边距与稳定系数的相关关系, 建立灰色关联预测模型, 计算塬边斜坡稳定的灌溉塬边距。计算结果表明: 灌溉 10 年间, 灌溉塬边距由 100 m 减至 0 m 时, 斜坡体内最大渗透流速增加, 塬区和塬边坡体内地下水位线均有不同程度的上升, 斜坡稳定系数呈递减趋势; 塬边斜坡稳定的灌溉安全距离, 即灌溉塬边距应大于 77.8 m; 得到的结论是: 灌溉塬边距是影响塬边斜坡体内地下水位抬升和斜坡稳定的关键因素, 合理地控制塬区农业引水灌溉塬边距是控制塬边斜坡灾害的根本措施。

关键词: 黄土台塬; 灌溉塬边距; 渗流过程; 安全距离

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)04-0007-06

Slope stability and safe distance between irrigation area and slope crest in Heifangtai, Yongjing, Gansu

WANG Qingtao¹, WU Wenbo², XUE Qian³

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. Energy China NWPC, Xi'an, Shaanxi 710032, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: A series of landslide disasters caused by irrigation in Heifangtai area, based on the distance definition between irrigation boundary and the boundary of the Loess Plateau, defined the concept of “Irrigation plateau margins”. Using GEOSTUDIO software to establish the slope hydrogeology and mathematical models, studied on the groundwater distribution rule of “Irrigation plateau margins”. Analyzed the relationship between “Irrigation plateau margins” and slope stability; Based on the coefficient of the relationship between “Irrigation plateau margins” and the stability, to establish a link between the gray forecasting model, calculating the slope stability “Irrigation plateau margins”. The results showed that: after 10 years of irrigation, the “Irrigation plateau margins” reduced from 100 m to 0 m, the maximum penetration velocity of slope continued increasing, the underground water level in varying degrees in plateau and plateau slope, the slope stability coefficient showed a decreasing trend. The safety distance should be more than 77.8 m. Further analysis of the conclusions: The “Irrigation plateau margins” is a key factor of the slope of groundwater and slope stability, the “Irrigation plateau margins” is the fundamental measure for controlling slope slope disasters.

Keywords: loess plateau; irrigation area; seepage process; safe distance

收稿日期: 2016-03-01; 修订日期: 2016-04-12

第一作者: 王庆涛(1989-), 男, 陕西人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地质灾害防治方面的技术和科研工作。E-mail: wangnishi@

163.com

0 引言

20 世纪 70 年代甘肃省永靖县盐锅峡地区三处水利工程的建设,极大的提高了当地的农业基本产量。水利工程提水灌溉,对黄土塬区的地下水进行了过量补充,地下水由西向东向塬边排泄,诱发了较多的塬边斜坡灾害。众多学者对塬区灌溉活动与地质环境的变化关系进行了研究,金艳丽^[1]等对于灌溉诱发黄土滑坡的形成机制展开了抗剪实验分析,对比了原状黄土的常规三轴剪切和常规固结排水剪切试验数据,得到了其稳态线和状态边界面的分布规律,揭示了饱和黄土的应力应变特性,较系统的分析了灌溉诱发型黄土滑坡的破坏机制。雷祥义^[2]、范立民^[3]等从地下水位的变化因素展开研究,认为土的抗剪程度的降低是因为地下水位的抬升。日本学者 D. Ma, S. Zhao 和 H. Li^[4]曾对黑方台灌溉地区台塬周边滑坡发生的规律和机理给出了合理的解释。王念秦^[5]对兰州大湾和永靖县黑方台地区的两个地方的黄土完成了室内的渗透试验,数据表明,黄土的渗透性能有水平和垂直方向的差异性,且与黄土的形成时代相关联,越新的黄土各向异性差异越显著,新黄土垂向的渗透系数远远高于水平方向上的,老黄土垂向渗透系数略小于水平方向的。众多学者对灌溉诱发型台塬滑坡失稳机理从土的强度理论、应力路径、滑坡的破坏机制等方面进行了深入研究,针对灾害特征提出了治理方案。然而,黑方台地区滑坡灾害的规模和频次仍逐年增加,当地政府采取了削坡、灌渠防渗等治理措施,甚至将整个台面台缘线以内 50 m 范围内划为禁灌区。本文针对塬区典型的灌溉特征,对灌区的整个渗流场进行了瞬态渗流数值模拟,分析了灌溉水的补给、排泄规律,探索合理地引水灌溉模式。

1 “灌溉塬边距”模型定义及构建

1.1 实例概况

甘肃黑方台灌区野狐沟北侧焦家崖头滑坡高约 120 m,总体坡度约 35°,呈凸型坡状,工程地质剖面见图 1。地层由上至下分别为:马兰黄土层,厚度约 50 m;粉质黏土层,厚度约 5 m;砂卵砾石层,厚约 5 m;最下部的白垩统砂岩夹泥岩,透水能力差,较坚硬。地下水位线位于粉质黏土层的顶面,高程为 1 642 m,地下水由西向东流动,在塬边斜坡以泉的形式线状排泄。该滑坡发生在塬区提水灌溉后第 10 年,为典型的灌溉诱发型滑坡。

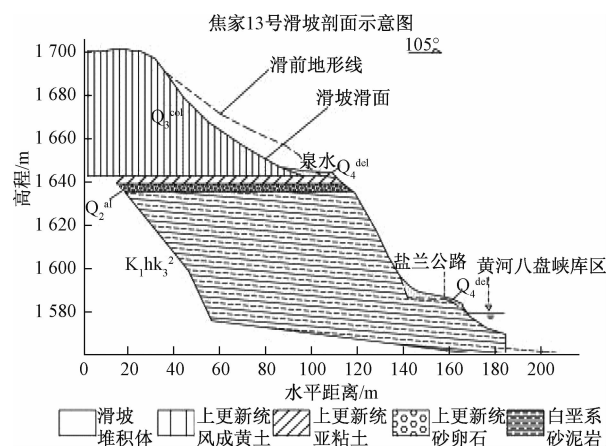


图 1 焦家 13 号滑坡工程地质剖面示意图

Fig. 1 The engineering geology section schematic diagram of Jiaojia No. 13 landslide slope

1.2 模型构建及定义

根据焦家 13 号滑坡实际滑动过程,由于坡面临空,滑体的剪出口处在粉质黏土层顶面,滑体由非饱和的风积黄土组成。因此,只选择上部的马兰黄土层、中部的粉质黏土层及位于粉质黏土层顶面的水位线为研究对象。利用 GEOSTUDIO 渗流分析软件的 SEEP/W 模块模拟该斜坡灌溉渗透的过程及土体内渗流场变化,概化计算水文地质模型见图 2,定义“灌溉塬边距”为“灌溉边界距塬边的距离”。设置“塬边距”为 100 m、80 m、60 m、50 m、40 m、30 m、20 m、10 m、0 m。

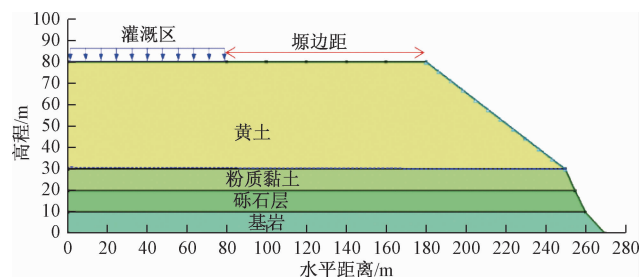


图 2 焦家崖头 13 号滑坡概化模型

Fig. 2 Landslide probability model of Jiaojia Yatou No. 13

1.3 参数选取

模型中非饱和区域为水位以上的风成黄土,渗透系数随含水量的变化而变化;模型中粉质黏土层为隔地层,饱和—非饱和渗流基本理论为饱和—非饱和 Darcy 定律。黄土的渗透系数参考野外抽水试验所得结果^[5],获得黄土层的垂直渗透系数为 0.12 m/d,粉质黏土层的渗透系数采用室内试验获得,所测的值 2.00×10^{-5} m/d。黄土的非饱和参数较难测定,采用 van Genuchten 模型对数据进行拟合,对非饱和和马兰黄土渗透模型生成渗透性系数函数曲线和水

土特征函数曲线(图3、图4)。拟合软件得到黄土的饱和含水率 s_{θ} 为44.5%,残余含水率 r_{θ} 为3%,其余模型参数为常数,定义模型参数 A 为40 kPa;常数 n 为3.2;常数 m 为0.45。粉质黏土层处于地下水位线以下,为饱和状态,只需要其饱和渗透系数。将渗透参数及渗透性系数函数曲线和水土特征函数曲线导入 SEEP/W 模块的水力参数模块即可进行计算。

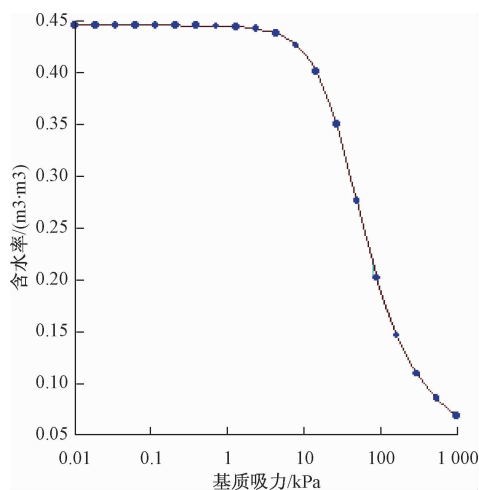


图3 马兰黄土土水特征曲线

Fig. 3 The soil water characteristic curve of Ma Lan loess

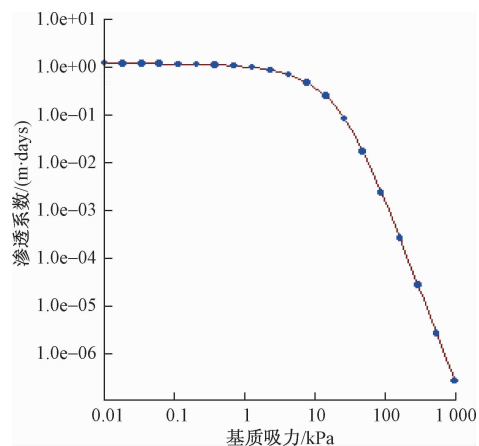


图4 马兰黄土渗透系数曲线

Fig. 4 The permeability coefficient curve of Ma Lan loess

2 “基于“灌溉塬边距”的台塬黄土斜坡渗流过程

据调查资料知^[5],黑方台滑坡灾害的高发期为提水灌溉后的10年时间。因此,灌溉周期模拟自1968年开始提水灌溉后的10年时间,年均灌溉量约为 $590 \times 10^4 \text{ m}^3$,灌溉面积约为 $6.67 \times 10^6 \text{ m}^2$,灌溉时间为一年灌溉2次,每年3月春灌和11月冬灌,渗流强度根据灌溉量计算为0.014 m/d,其它月份停止灌溉,地下

水位线位于黏土层顶面。图5~图7分别为“灌溉塬边距”100 m、60 m、0 m,灌溉10年后斜坡体孔隙水压力等值线和水位线图。

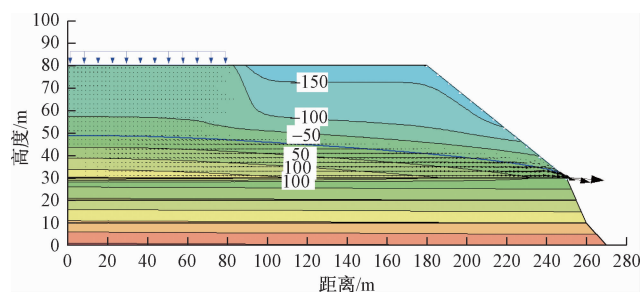


图5 灌溉塬边距100 m时孔隙水压力分布云图

Fig. 5 The pore water pressure distribution of the irrigation tableland margin at 100 m

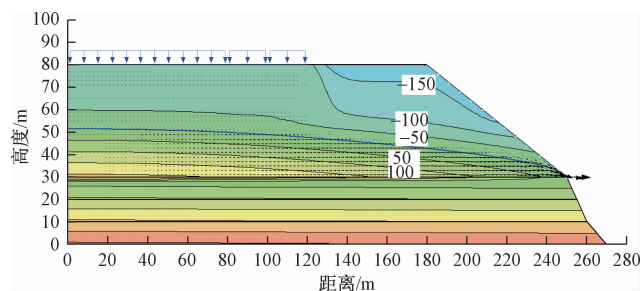


图6 灌溉塬边距60 m时孔隙水压力分布云图

Fig. 6 The pore water pressure distribution of the irrigation tableland margin at 60 m

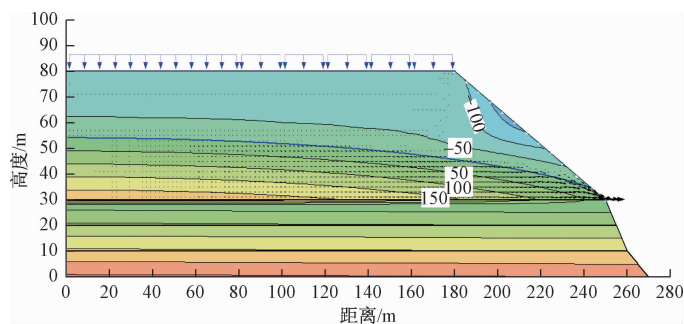


图7 灌溉塬边距0 m时孔隙水压力分布云图

Fig. 7 The pore water pressure distribution of the irrigation tableland margin at 0 m

由图5~图7可知,灌溉过程中,黄土层下部的粉质黏土隔水层形成了黄土—粉质黏土层地下水渗流控制边界,对塬面的入渗水起到隔水效应,水流基本从黏土层顶面与斜坡相接处向外渗,与实际勘察过程中坡体泉水出露点情况一致,且随灌溉塬边距的减小,由图8知,坡体内最大渗透流速由0.81 m/d增加至0.85 m/d,最大渗透流速呈现增大趋势。由图9知,随灌溉塬边距的减小,坡面黏土层顶部的水力梯度同样呈现

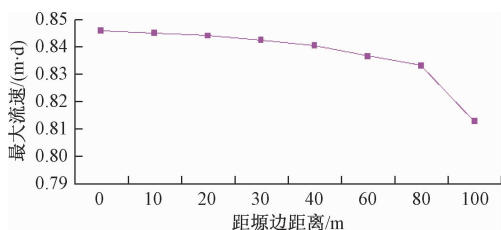


图 8 灌溉塬边距与坡体最大渗透流速关系图

Fig.8 The diagram between slope tableland and the maximum infiltration velocity

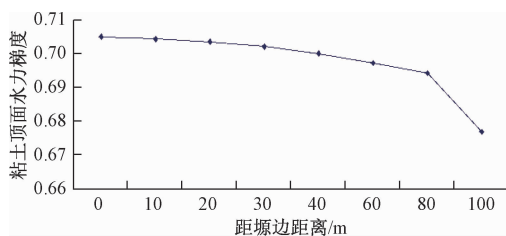


图 9 灌溉塬边距与黏土层顶面水力梯度关系图

Fig.9 The diagram between slope tableland and the hydraulic gradient at clay layer top surface

增大趋势。水力梯度增大,泉水流量随之增大。一方面增强了灌溉水对坡面的侵蚀力度,另一方面增加了坡体的渗透力,降低了土体的抗剪强度,导致边坡容易变形。

塬区地下水位线亦受“灌溉塬边距”影响,由图 10 可知,灌溉 10 年后,地下水位线均呈现一定程度的上升,但随灌溉塬边距的减小,上升幅度略有减小,“灌溉塬边距”0 m 时,塬区地下水位线上升了 23 m,所得模拟结果与实际勘察情况较一致;“灌溉塬边距”100 m 时,10 年间塬区地下水位线上升了 18 m。由图 11 可知,灌溉塬边距与塬边坡体内地下水位线关系密切相关,灌溉塬边距 0 m 时,地下水位线上升了 14.75 m,灌溉塬边距 100 m 时,地下水位线上升了 9.75 m。分析可知,适当的控制灌溉塬边距,可有效的降低塬边斜坡体内地下水位,减小了坡体内因水位上升产生的浮托力,有效的增加坡体的稳定性。

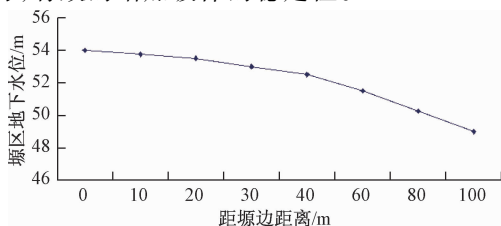


图 10 灌溉塬边距与塬区地下水位线关系图

Fig.10 The diagram between irrigation tableland margin and the tableland underground water level

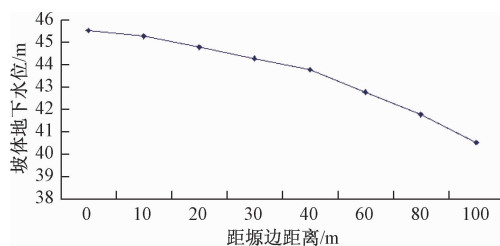


图 11 灌溉塬边距与坡体地下水位线关系图

Fig.11 The diagram between Irrigation tableland margin and the slope underground water level

3 台塬斜坡灌溉作用的安全“灌溉塬边距”

3.1 计算模型及理论

由于斜坡体为非饱和的土质边坡,其非饱和土的抗剪强度需要在 Mohr-Coulomb 抗剪强度公式的基础上考虑基质吸力的贡献值。本文采用 1978 年 Fredlund^[5]提出以正应力与基质吸力作为变量的非饱和土抗剪强度公式,其表达式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中: τ_f ——潜在滑面上任一点的抗剪强度;

c' ——有效内聚力;

σ ——作用于土条上的总法向应力;

μ_a ——孔隙气压力;

φ' ——有效内摩擦角;

μ_w ——孔隙水压力;

φ^b ——抗剪强度随基质吸力增加而增加的速率。

非饱和土坡的稳定性计算可根据 Fredlund 提出的基于双应力状态变量建立的非饱和土坡体的稳定性公式,选用计算假定最少的 Morgenstern-Price 法的计算结果对灌溉后斜坡稳定性进行评价。假设各地层为均质各向同性土层,将 SEEP/W 模块计算的渗流场应用于边坡稳定性计算,结合三轴试验(常规三轴试验,固结不排水剪法)所得参数见表 1^[5]。稳定性计算结果见表 2。

表 1 模型计算参数

Table 1 The parameter calculation model

序号	地层	天然重度 /(kN/m ³)	内聚力 /kPa	内摩擦 角 φ /(°)	φ^b /(°)
1	黄土	16.9	28.2	25.5	15.6
2	粉质黏土	20.0	25.0	15.0	/

3.2 基于灰色理论的安全“灌溉塬边距”预测

利用 GEOSTUDIO 软件计算出了灌溉作用在不同“塬边距”下的稳定系数,灌溉塬边距与稳定系数为非线性关系,为了界定塬边斜坡稳定的灌溉塬边距,即灌溉边界至塬边斜坡的安全距离,利用灰色理论预测模

表 2 不同灌溉塬边距情况下稳定性计算结果
Table 2 The calculation results of different irrigation conditions in stability margin

灌溉塬边距/m	100	60	50	30	10	0
稳定系数	1.139	1.114	1.11	1.089	1.036	1.01

型 GM(1,1) 对灌溉作用的安全灌溉塬边距进行预测。GM(1,1) 模型由一个单变量的一阶微分方程构成,主要用于复杂系统某一主导因素特征值的拟合和预测,以揭示主导因素变化规律和未来发展变化态势。

微分方程模型,一般形式如下:

表 3 误差检验

Table 3 The error test

灌溉塬边距/m	60	50	40	30	20	10	0
计算稳定系数	1.114	1.110	1.090	1.089	1.067	1.036	1.010
预测稳定系数	1.122	1.106	1.091	1.077	1.062	1.048	1.010
残差	-0.008	0.004	-0.001	0.012	0.005	-0.012	0
相对误差	-0.0071	0.0036	-0.0009	0.0111	0.0047	-0.0115	0
级比	/	0.9964	0.9820	0.9991	0.9798	0.9709	0.9749
级比偏差	/	-0.1000	-0.0841	-0.1030	-0.0817	-0.0719	-0.0763

对灌溉塬边距稳定系数关系进行建模,将 6 种“灌溉塬边距”下的计算稳定系数数据序列(表 3)带入灰色系统理论建模软件,得到 GM(1,1) 模型,计算结果如下:

微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} - 0.014x^{(1)}(t) = 1.027 \quad (4)$$

时间响应方程:

$$x^{(1)}(t) = 1.034 e^{0.014t} - 73.357 \quad (5)$$

依据建立的灌溉塬边距-稳定系数灰色关联预测模型,分别计算出了灌溉塬边距为 70 ~ 120 m 的稳定系数,结合模拟得到的 0 ~ 60 m 内的稳定系数,可以获得 0 ~ 120 m 范围内灌溉塬边距与稳定系数分布图(图 12),由图 12 可以求得稳定系数为 1.15 的灌溉塬边距预测值为 77.8 m,基于此,可判定台塬斜坡灌溉作用的安全灌溉塬边距为 77.8 m。

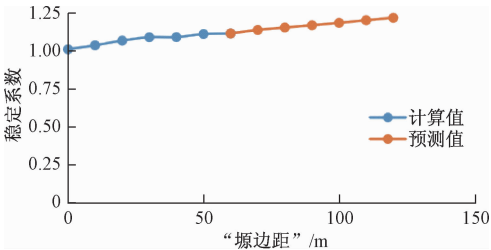


图 12 斜坡稳定的安全灌溉塬边距预测图
Fig. 12 The forecast chart of the slope stability safety margin in irrigation

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (2)$$

式中: a 为发展系数; b 为灰作用量。

时间响应方程模型为

$$\hat{x}^{(1)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a} (t=0,1,2,\dots,n) \quad (3)$$

为保证建模方法的可行性,需对计算稳定系数与预测稳定系数做检验处理。级比计算结果见表 3,由计算数据知,平均相对误差为 0.643%,级比偏差均小于等于 0.1,则认为达到较高的预测要求^[6],该数列可以作为模型 GM(1,1) 的数据进行理想的灰色预测建模。

4 结 论

(1) 提出“灌溉塬边距”概念,进行了非饱和瞬态渗流数值模拟。验证了灌溉塬边距是影响塬区及塬边斜坡体内地下水位抬升和渗透流速的关键因素。

(2) 基于非饱和抗剪强度的极限平衡法,考虑地下水位线变化与斜坡土体内基质吸力分布状态的关系,运用 Morgenstern-Price 法,进行了不同“灌溉塬边距”的实例斜坡稳定性评价。结果表明,随灌溉塬边距减小,斜坡稳定系数呈递减趋势,斜坡的稳定度与灌溉塬边距密切相关。

(3) 基于灌溉塬边距与稳定系数的相关关系,建立灰色关联预测模型,预测塬边斜坡稳定的“灌溉塬边距”。得到塬边斜坡稳定的灌溉的安全距离,即灌溉塬边距为 77.8 m。因此,合理地控制塬区农业引水灌溉灌溉塬边距是控制塬边斜坡灾害的根本措施。

参考文献:

[1] 金艳丽,戴福初. 饱和黄土的静态液化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008(12): 3293 - 3298.
JIN Yanli, DAI Fuchu. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(12): 3293 - 3298.

[2] 雷祥义. 泾阳南塬黄土滑坡与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报, 1994, 3(1): 56 - 64.
LEI Xiangyi. The hazards of loess landslides in the

- southern tableland of Jingyang county, shanxi and their relationship with the channel water into fields [J]. Journal of Engineering, 1994, 3(1): 56-64.
- [3] 范立民, 岳明, 冉广庆. 泾河南岸崩岸型滑坡的发育规律[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(5): 33-35.
- FAN Limin, YUE Ming, RAN Guangqing. Development pattern of slumping bank type landslides at the south bank of Jinghe, Shanxi province [J]. Coal Geology of China, 2004, 16(5): 33-35.
- [4] Ma D, Zhao S, Li H. 曾康译. 由灌溉引起的阶地边缘黄土滑坡[J]. 四川水利, 1998, 19(4): 63-64.
- Ma D, Zhao S, Li H. translation by Zeng Kang. The loess landslide of terrace edge caused by irrigation [J]. Sichuan Water Resources. 1998, 19(4): 63-64.
- [5] 王念秦, 张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1999.
- WANG Nianqin, ZHANG Zhuoyuan. Study on loess landslide disaster [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999.
- [6] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LIU Sifeng. The grey system theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2004.

封面照片说明

浙江遂昌县苏村崩塌滑坡灾害

2016年9月28日17时28分,浙江省丽水市遂昌县北界镇苏村上村(自然村)后山山体发生崩塌滑坡,造成20户房屋被埋,17户房屋进水,28人死亡失踪(包括动员撤离的一名镇干部)。此次地质事件的总特征为先崩后滑。危岩崩塌冲击方向 235° ,沿斜坡滑移受阻挡后转向 205° 。崩滑区后缘高程约780 m,前缘高程约320 m,高差460 m,崩滑区总长度约1 000 m,可分为滑移崩塌区,主滑坡区和前缘堆积区。崩塌滑坡碎石流总体积约 $90 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

此次地质灾害事件是一个链式反应过程,可以划分为山岩开裂—滑移剪出一崩塌冲击—老崩积体滑坡—摧毁上村—堵河堰塞成湖等六个阶段。整个事件是后山滑移式崩塌与斜坡中前部推移式滑坡接续作用的产物。(1)山岩开裂:2012年拍摄的航片上清楚显示,后缘山顶弧形裂缝已经形成。(2)滑移剪出:数年来多次掉石头,今年尤甚。后缘山体开裂条件下,山顶危岩一直顺着底部外倾节理面蠕动滑移,高位剪出。(3)崩塌冲击:崩塌块石流在上段受限于两侧岩壁,特别是东南侧岩壁陡立顺直,中段受到西南侧原有崩积体阻挡,运动过程中向左偏转方向。(4)老崩积体滑坡:新的崩塌块石流挟高位势能冲击山下斜坡上多年形成的崩塌堆积体,老崩塌块石堆积体复活形成滑坡,形成“零存整取”效应。老崩积体是地质历史上多次断续崩塌在村后基岩斜坡上形成的块石堆积。(5)摧毁上村:老崩塌体滑坡前缘压埋村庄,酿成灾难。后山崩塌前一直在掉石头,半山腰岩石出现崩裂,接续滚落,崩塌冲击引起堆积斜坡移动,导致村中地面突然拱起,随后滑坡块石流掩埋村庄。(6)堵河堰塞:滑坡冲入前缘小河,形成堰塞湖,最大水深约20 m。块石流冲到小河对岸(左岸)受到阻挡而壅高,形成高于右岸的“反翘”地形。堰塞体透水性好,降雨停止后,向下游的泄水量大于上游来水量,堰塞湖水位缓慢下降。

(中国地质环境监测院(应急技术指导中心)刘传正 供稿)