

黑方台灌溉渗透型黄土滑坡的运动学模拟研究*

胡 炜^① 张茂省^① 朱立峰^① 汪发武^②

(^①中国地质调查局西安地质调查中心 西安 710054)

(^②日本岛根大学地球科学系 岛根 690-8504)

摘 要 研究滑坡的运动学特征对于认识和减缓滑坡灾害风险具有重要的意义。以甘肃省永靖县黑方台焦家崖头灌溉渗透型黄土滑坡为研究对象,在工程地质测绘和实验测试的基础上,根据滑坡表现出的各种迹象,基于有限差分法滑坡运动模型对滑坡运动的全过程进行了模拟,并分析了滑坡的速度场。模拟结果表明:滑坡的速度可分为启动加速,高速波动和碰撞减速 3 个阶段,全程平均滑速为 $8.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,表现为高速滑动特征,具有较大的危害性。不同计算方法得出的滑坡速度不尽相同,其中数值模拟的剪出口速度比美国土木工程师协会推荐法结果大 $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,比变分法计算速度小 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,与潘家铮算法的下限值较接近。本次模拟工作对于潜在的灌溉型黄土滑坡的致灾范围和滑速预测具有一定参考意义。

关键词 黑方台 黄土滑坡 有限差分法 运动学模拟

中图分类号:P642.22 文献标识码:A

KINEMATIC SIMULATION OF IRRIGATION-INDUCED LOESS LANDSLIDE IN HEIFANGTAI

HU Wei^① ZHANG Maosheng^① ZHU Lifeng^① WANG Fawu^②

(^①*Xi'an Centre of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054*)

(^②*Department of Geoscience, Shimane University, Shimane, Japan 690-8504*)

Abstract This paper aims to study the kinematic features of landslides to assess and mitigate landslide risks. It takes Jiaojiaayatou irrigation-induced loess landslide in Heifangtai, Yongjin, Gansu Province as the research object. It is based on engineering geological mapping and soil tests, as well as landslide features analysis. It simulates the whole moving process of the landslide and analyzes the velocity field using the finite-difference-method-based kinematic model. The simulation results show that the velocity field of the landslide can be divided into three stages: the initial acceleration stage, the high-speeding fluctuation stage and the collision deceleration stage. The average velocity in the whole process is about $8.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, which represents a high-speed moving feature and can cause dangerous results. The velocity at the shear opening from the numerical simulation is $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ higher than that calculated using the ASCE recommended method, $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ lower than that calculated using the variational method, and close to the lower limit calculated using Pan Jiazheng Method. This study is helpful to the prediction of sliding velocity and influencing area of potential irrigation-induced loess landslides.

Key words Heifangtai, Loess landslide, Finite difference method, Kinematic simulation

* 收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-12-08.

基金项目: 国家科技支撑专题“甘肃黑方台滑坡群防治技术与示范研究”(2012BAK10B02-5), 国土资源大调查项目(1212011014024) 资助。

第一作者简介: 胡炜, 从事地质灾害调查与研究. Email: whwhuhw@hotmail.com

1 引言

高速滑坡的运动学机理研究是滑坡灾害研究的重要部分,国内外学者从不同角度开展了滑坡运动学机理研究工作。

在系统性工作方面,胡广韬^[1]讨论了滑坡全程的运动机理,提出了滑坡高速运动机理的“八大效应”,是对高速滑坡运动机理的系统总结;张明等^[2]首次对高速远程滑坡-碎屑流的研究进行了系统的归纳和总结。

在理论研究方面,Heim 于 1932 年提出的基于牛顿第二定律的雪橇模型^[3]最为普及,Scheidtger^[4]从能量守恒角度、Sassa^[3]考虑孔隙水压力的影响,分别对雪橇模型作了相应改进;廖小平等^[5]、刘忠玉等^[6]各自建立了块体运动模型;卢万年^[7]基于机翼理论分析了高速滑坡体的运行规律,得出考虑空气动力效应的运动微分方程。

在应用研究方面,可以概括为解析法、模型试验、数值模拟、数理统计 4 种类型。如:潘家铮^[8]、胡广韬等^[9]、王家鼎等^[10]、邢爱国等^[11]分别用解析方法计算了滑坡的滑速;邢爱国等^[12]、刘涌江等^[13]采用风洞模型试验测定了滑坡凌空飞行的空气动力学参数,导出了大型高速滑坡近程活动阶段凌空飞行的微分方程式;黄润秋^[14]提出了崩滑流全过程模拟的学术思想体系,建立了与之配套的全过程模拟数学-力学原理,在此框架内,学者们采用多种数值模拟方法研究了滑坡运动过程^[15~18];李保雄和王得楷^[19]、王念秦等^[20]在统计基础上,提出了滑坡空间预报公式,建立了滑距预测模型。

黄土是水敏性极强的土体。在灌溉水入渗作用下,黄土由非饱和变为饱和,超孔隙水压力上升,并在自重、地脉动、地震等因素作用下导致黄土液化,诱发高速黄土滑坡,是一种被普遍接受的灌溉渗透诱发黄土滑坡发生机理^[21~24]。Sassa^[3]在一系列环剪试验基础上提出了考虑孔隙水压的三维滑坡运动模型,并写成了有限差分程序,非常适用于滑动面发生液化的滑坡运动学研究。本文以甘肃省永靖县黑方台焦家崖头灌溉渗透型黄土滑坡为研究对象,在滑坡工程地质测绘和实验测试的基础上,分析滑坡的形成条件,建立基于有限差分法的 Sassa 三维滑坡运动模型,对该滑坡运动的全过程进行模拟,并分析滑坡的速度变化规律。将得到的滑坡剪出口速

度与几类常用解析法计算结果进行对比,探讨模型对于灌溉渗透诱发黄土滑坡运动机理研究的适用性,为今后类似滑坡的空间预测提供典型范例。

2 滑坡形成条件

甘肃省永靖县黑方台在历史上是个旱塬。台塬典型地层结构(图 1)的地层由上至下分别是晚更新统风成黄土层、中更新统冲积粉质黏土层、中更新统冲积砂砾石层和下白垩统河口群砂泥岩互层。黑方台自 20 世纪 60 年代开始大水灌溉,灌溉水入渗至黄土层底部,遇相对隔水的粉质黏土层阻隔,形成饱水黄土层,并且水位不断上升,从而诱发大量黄土滑坡。

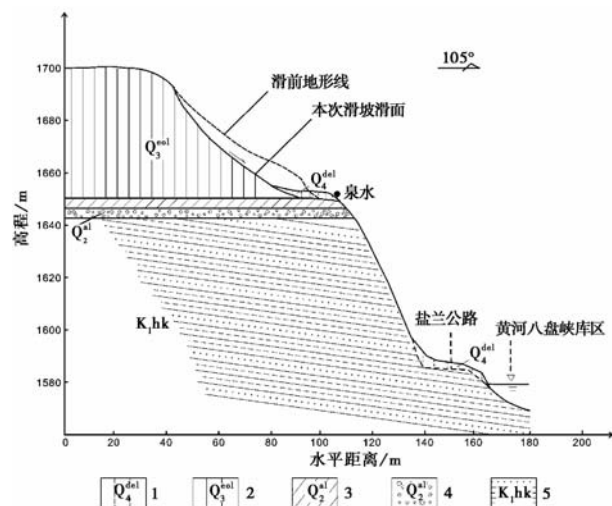


图 1 焦家崖头滑坡剖面示意图

Fig. 1 The schematic drawing of Jiaojiaayatou landslide profile

1. 滑坡堆积体; 2. 上更新统风成黄土; 3. 中更新统粉质黏土;
4. 中更新统砂卵石层; 5. 白垩系砂泥岩

焦家崖头黄土滑坡位于黑台南缘最陡坡段处,斜坡高约 130m,坡体总体呈上凹下陡(图 1),上部黄土段坡度约 40°,下部基岩段坡度约 63°。坡脚为盐兰公路,宽仅 10m 左右,公路外侧为黄河八盘峡库区。该段斜坡发生过多次高位滑动,最新一次发生在 2011 年 4 月 27 日下午 15 时左右,滑坡体积约 $0.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑向 105°,滑坡后壁圈椅状形态明显,周界清晰。滑动后,滑床上残存滑体很少,滑体多解体为散体粉状,滑带和堆积体底部土体呈塑流状态,表明土体发生了液化。坡脚的滑坡堆积体宽约 60m,厚约 2~3m,最厚处达 4m,堵塞公路并部分冲入八盘峡库区,可见堆积量约 3 000m³。

3 三维滑坡运动模型

3.1 模型建立

对滑坡形成条件的分析表明,滑坡滑带及滑道土体均发生了液化, Sassa 三维滑坡运动模型是适用的。提取焦家崖头坡段地形数据,形成 76×34 个差分节点,这些节点将模型划分为 75×33 个网格,每个网格大小为 $5 \times 5 \text{m}$ (图 2)。为了避免滑体运动触及计算边界造成计算不收敛,对公路外侧包括黄河的区域进行人工勾画。这样处理虽然忽略了滑体进入黄河产生的涌浪效应,但不影响分析滑坡在入水前的运动学特征。

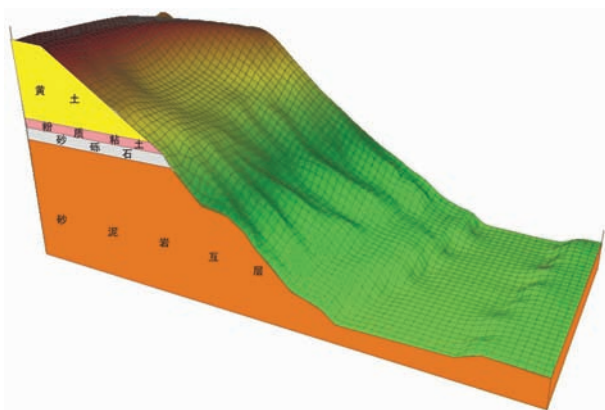


图 2 焦家崖头滑坡三维模型

Fig. 2 3D model of Jiaojiaayatou landslide

3.2 参数选取

计算所需的主要土性参数包括:孔压系数 B_{ss} , 侧压力系数 k , 有效动摩擦系数 $\tan\varphi_s$, 稳态残余抗剪强度 τ_{ss} , 滑带黏聚力 c_{h2} 和滑体重度 γ [25]。滑坡大变形条件下的滑带力学参数需要特殊仪器测定,目前最先进和有效的是环剪试验。本次计算在大量土力学实验的基础上,参考同类滑坡的计算经验 [26],综合考虑滑坡运动路径上地层结构、土体性

表 1 焦家崖头滑坡运动学模拟计算参数

Table 1 Calculating parameters for Jiaojiaayatou landslide kinematic simulation

位置	超孔隙水压力系数	滑体土侧压力系数	有效摩擦角/ $(^\circ)$	滑带稳态剪切阻力/ kPa	滑带黏聚力/ kPa	滑体重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
黄土层内破裂面	1.0	0.7	12	1		
基岩滑道	0.95	0.7	25	8	0	18
坡脚公路	0.8	0.7	35	11		

质、饱和度、排水条件等因素,将滑坡路径分为黄土层内破裂面、基岩滑道和坡脚公路 3 部分,分别确定土性参数 (表 1)。

4 模拟结果分析及讨论

4.1 模拟结果分析

设置进行 5000 步迭代计算,每隔 100 步迭代输出一组数据。模拟结果表明,实际迭代 3514 步,滑坡运动了 27s 左右停止。图 3 和图 4 分别是滑坡启动后 12.4s 和 20.4s 的斜坡地形图。

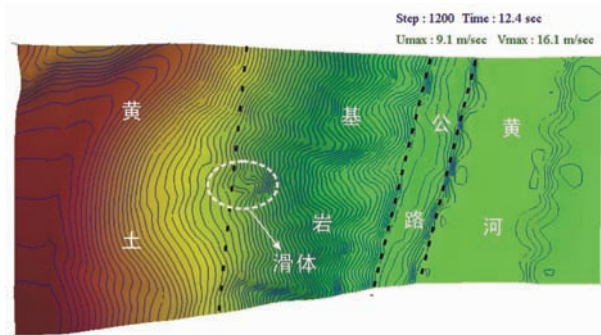


图 3 12.4s 的滑坡地形

Fig. 3 Landslide topography for 12.4s

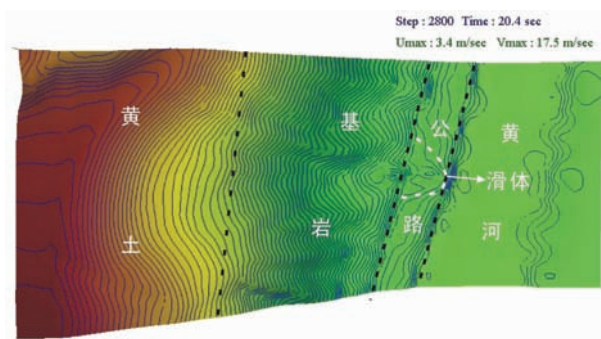


图 4 20.4s 的滑坡地形

Fig. 4 Landslide topography for 20.4s

图 5 是焦家崖头滑坡的模拟地形。滑坡在坡脚公路处堆积成扇形,部分滑体继续运动至黄河里。堆积体在公路靠近八盘峡一侧最宽,为 45m,比实测堆积体 (图 6) 最宽处小 5m 左右;堆积体厚度介于 0~6m 之间,与实测的 2~4m 基本相符。

根据模拟所得结果绘制滑体内沿着滑坡滑向的最大速度变化曲线 (图 7),观察该曲线形态,大致可将 JH13 号滑坡运动分为 3 个阶段:

(1) 0~12.4s 为加速阶段。其中 0~7.5s 为匀加速运动,加速度约为 $0.75 \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; 7.5~8.4s 速度

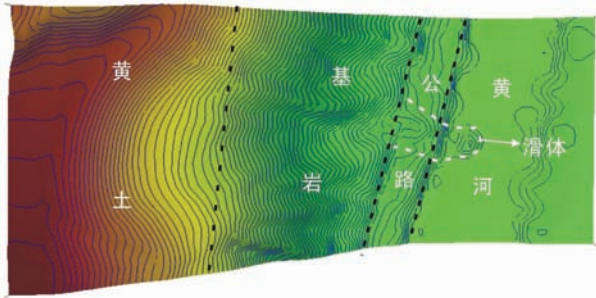


图5 模拟滑后地形图

Fig. 5 Simulated landslide topography after sliding

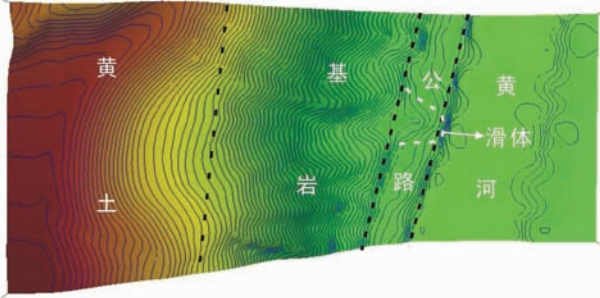


图6 实测滑后地形图

Fig. 6 Measured landslide topography after sliding

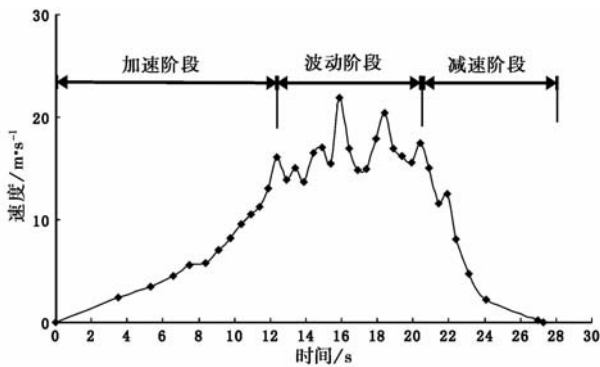


图7 焦家崖头滑坡最大速度随时间变化曲线

Fig. 7 Changing curve of the maximum velocity with time for Jiaojiaoyatou landslide

不变,随后直至 12.4s 又变为匀加速运动,只是加速度值增大到了 $2.58\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

(2) 12.4 ~ 20.4s 为波动阶段。滑体最大速度经历了若干次振荡,在 15.9s 和 18.4s 时速度达到极大值,分别为 $21.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $20.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 而在 13.9s、16.9s 和 19.9s 时速度达到极小值,分别为 $13.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $15.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 20.4 ~ 27.3s 为减速阶段。在 7s 左右时间内,滑体最大速度由 $17.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急剧减小到 0,平均加速度约为 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

将速度分析结果与 12.4s 和 20.4s 的滑坡运动

形态进行对比分析。在 12.4s 时,滑体质心刚好运动至基岩,说明滑体在黄土层内一直在加速; 20.4s 时滑体质心运行至坡脚,表明滑体在基岩破段的速度随着局部地形的变化有波动,但一直维持在高位; 之后滑体触及公路,发生碰撞后解体,前缘部分滑体落入水库中,中后部滑体速度骤减,并在公路处堆积。

由滑坡运动全过程来看,整个滑动过程持续约 27s 后停止,滑动水平距离约 210m,落差 101m,滑距约为 233m,平均滑速为 $8.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,表现为高速远程滑动特征,远远超出了一个人的奔跑速度,具有极大的危害性。

4.2 讨论

上述模拟结果表明,滑坡在剪出口处的速度基本决定了滑坡的整体动能和破坏力,因此,准确确定剪出口的启动速度具有重要实用价值。除了本文的数值模拟方法外,还有许多滑坡速度计算方法,比如潘家铮法^[8]、美国土木工程师协会推荐法^[27]、变分法^[10]等等。

为了验证本次模拟,采用以上 3 种方法计算焦家崖头滑坡滑体质心运动至剪出口的速度,其中变分法计算速度引自王家鼎等的一级近似解^[10]。由焦家崖头滑坡滑面的试验参数结合经验值确定计算参数(表 2),由计算结果(表 3)可见,数值模拟所得速度比美国土木工程师协会推荐法结果大 $1.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,比变分法计算结果小 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,与潘家铮算法的下限值较接近。

表 2 焦家崖头滑坡剪出口速度计算参数

Table 2 Parameters for the shear opening velocity calculation of Jiaojiaoyatou landslide

滑面加权平均倾角 $\alpha/(\circ)$	25.7
滑体重心落差/m	20
滑体重心距水面高度/m	71
滑体体积 V/m^3	9000
经验系数 L_0	0.4 ~ 0.75
黏聚力 c/kPa	0
动摩擦角 $\varphi/(\circ)$	12

这些算法都是基于能量守恒定律的,但考虑的因素各有不同:

(1) 潘家铮法认为水库岸坡变形基本上属于垂直变形,按垂直变形计算滑落速度为:

$$V = L_0 \sqrt{2gH}$$

表3 焦家崖头滑坡剪出口速度比较

Table 3 Comparison of the shear opening velocities of Jiaojiayatou landslide

计算方法	潘家铮法	美国土木工程师协会推荐法	变分法	差分数值模拟
剪出口速度/ $m \cdot s^{-1}$	14.9 ~ 28	14.9	18.04	16.1

式中, L_0 为与多因素有关的系数, 一般为 0.4 ~ 0.75; H 为滑体重心距水面高度。

(2) 美国土木工程师协会推荐法考虑滑动过程中动摩擦阻滑效应, 计算滑落速度为:

$$V_s = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{f}{\tan\alpha}\right)}$$

式中, α 为滑面倾角; f 为滑面的滑动摩擦系数; H 为滑体重心落差。

(3) 王家鼎等的变分法^[10] 在美国土木工程师协会推荐法基础上进一步考虑了滑动面上超孔隙水压力的润滑效应, 计算滑落速度为:

$$V_s = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{f}{\tan\alpha}\right) + \frac{2ufH}{\sin\alpha}}$$

式中, u 为滑面孔隙水压力, f 为滑动摩擦系数, 采用 Scheidegger 的统计公式计算:

$$\lg f_e = -0.1566 \lg V + 0.62419$$

(4) 本文模拟采用的假设与变分法相同, 但焦家崖头滑坡在经历了近 10a 的滑动后, 较王家鼎等^[10] 采用的地形已经有所变化, 主要体现在滑坡后缘的溯源侵蚀和滑坡平台的扩展, 使得在黄土层内的滑面倾角变缓, 启动速度较变分法计算有所降低。

5 结 论

(1) 采用有限差分法可以完整全面地模拟焦家崖头滑坡运动的全过程。根据最大速度可将滑坡全过程分为 3 阶段, 即启动加速阶段, 高速波动阶段和碰撞减速阶段, 各阶段分别对应黄土层内滑面、基岩滑道和坡脚公路。

(2) 将焦家崖头滑坡的剪出口速度数值模拟结果与潘家铮算法、美国土木工程师协会推荐法和变分法计算结果对比, 结果表明数值模拟结果处于各种计算方法结果的中值, 结果较合理。

(3) 焦家崖头滑坡具有高位剪出、滑带液化、滑床残留物少等特征, 是典型的代表性高速黄土滑坡。本次模拟表明, 基于 Sassa 三维滑坡运动模型的有限差分法可以有效地再现该类滑坡的运动全过程,

从而对潜在的滑坡进行致灾范围和滑速预测。

致 谢 本文在建模过程中得到了长安大学李同录教授、张克亮硕士和李萍硕士的帮助, 深表谢意!

参 考 文 献

- [1] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社, 1995.
Hu Guangtao. Landslide Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [2] 张明, 殷跃平, 吴树仁, 张永双. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 805 ~ 817.
Zhang Ming, Yin Yueping, Wu Shuren, Zhang Yongshuang. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 805 ~ 817.
- [3] Sassa K. Geotechnical model for the motion of landslides. Special lecture of the 5th International Symposium on Landslides, Landslides, 1988, (1): 37 ~ 55.
- [4] Scheidegger AE. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231 ~ 236.
- [5] 廖小平, 徐峻岭, 郑静. 高速远程滑坡的动力分析和运动模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 4(2): 26 ~ 30.
Liao Xiaoping, Xu Junling, Zheng Jing. Mechanical analysis and movement simulation for high speed and long distance landslide. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(2): 26 ~ 30.
- [6] 刘忠玉, 马崇武, 苗天德, 慕青松. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 742 ~ 746.
Liu Zhongyu, Ma Chongwu, Miao Tiande, Mu Qingsong. Kinematic block model of long run-out prediction for high-speed landslides. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 742 ~ 746.
- [7] 卢万年. 用空气动力学分析坡体高速滑动的滑行问题[J]. 西安地质学院学报, 1991, 13(4): 77 ~ 85.
Lu Wannian. Airo-dynamic approach to sliding problems of high landslide. Journal of Xi'an College of Geology, 1991, 13(4): 77 ~ 85.
- [8] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定与滑坡分析[M]. 北京:水利出版社, 1980.
Pan Jiazheng. Anti-sliding Stability of Structures and Landslide Analysis. Beijing: Water Conservancy Press, 1980.
- [9] 胡广韬, 毛彦龙, 杨建宏. 论基岩滑坡的临床聚能与启程弹冲[J]. 西安地质学院学报, 1992, 14(4): 50 ~ 57.
Hu Guangtao, Mao Yanlong, Yang Jianhong. On the accumulated strain energy close sliding plane and the elastic by impulsive motion along the initial path of bedrocks landslide. Journal of Xi'an College of Geology, 1992, 14(4): 50 ~ 57.
- [10] 王家鼎, 肖树芳, 张俾元. 灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 241 ~ 246.
Wang Jiading, Xiao Shufang, Zhang Zhuoyuan. The mechanism for movement of irrigation-induced high-speed loess landslide. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 241 ~ 246.
- [11] 邢爱国, 殷跃平. 云南头寨滑坡全程流体动力学机理分析

- [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, **37**(4): 481~485.
Xing Aiguo, Yin Yueping. Whole course analysis on hydrokinetics mechanism of Touzhai Gully landslide. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, **37**(4): 481~485.
- [12] 邢爱国, 高广运, 吴世明. 高速滑坡飞行气动特性的风洞试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, **30**(5): 633~638.
Xing Aiguo, Gao Guangyun, Wu Shiming. Study on wind tunnel testing of aerodynamic properties of high-speed landslide flying. Journal of Tongji University(Natural Science), 2002, **30**(5): 633~638.
- [13] 刘涌江, 胡厚田, 白志勇. 大型高速滑坡体运动的空气动力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(5): 784~789.
Liu Yongjiang, Hu Houtian, Bai Zhiyong. Testing study on aerodynamics effect of large-scale and high-speed flying landslide. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(5): 784~789.
- [14] 黄润秋. 灾害性崩滑地质过程的全过程模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, **5**(增): 11~17.
Huang Runqiu. Full-course simulation of hazardous rockfalls and avalanches. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, **5**(s): 11~17.
- [15] 程谦恭, 胡厚田. 刷冲式高速岩质滑坡全过程运动学数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2000, **35**(1): 18~22.
Cheng Qiangong, Hu Houtian. Discrete element simulation of full-course kinematics of rocky high-speed landslide. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, **35**(1): 18~22.
- [16] 殷坤龙, 姜清辉, 汪洋. 新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(7): 959~962.
Yin Kunlong, Jiang Qinghui, Wang Yang. Numerical simulation on the movement process of Xintan landslide by Dda method, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(7): 959~962.
- [17] 刘高, 邓建丽, 梁昌玉. 有限体积法在滑坡滑动过程模拟中的应用[J]. 地球科学进展, 2007, **22**(11): 1129~1133.
Liu Gao, Deng Jianli, Liang Changyu. The application of finite volume method to modeling landslide motion. Advances in Earth Science, 2007, **22**(11): 1129~1133.
- [18] 邓辉, 黄润秋. 岩口滑坡的发育特征及运动过程研究[J]. 成都理工学院学报, 1999, **26**(3): 283~286.
Deng Hui, Huang Runqiu. Development characters and kinematic course of the Yankou landslide. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, **26**(3): 283~286.
- [19] 李保雄, 王得楷. 黄土滑坡空间预报的一种新理论[J]. 甘肃科学学报, 1998, **10**(3): 57~58.
Li Baoxiong, Wang Dekai. A new theory of space forecast for loess landslides. Journal of Gansu Sciences, 1998, **10**(3): 57~58.
- [20] 王念秦, 张倬元, 王家鼎. 一种典型黄土滑坡的滑距预测方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003, **33**(1): 111~114.
Wang Nianqin, Zhang Zhuoyuan, Wang Jiading. A forecasting method of sliding distance on typical loess landslides. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2003, **33**(1): 111~114.
- [21] 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化[J]. 地质论评, 1992, **38**(6): 532~539.
Wang Jiading. A mechanism of high-speed loess landslides—saturated loess creeping liquefaction. Geological Review, 1992, **38**(6): 532~539.
- [22] 王家鼎, 刘悦. 高速黄土滑坡蠕滑动液化机理的进一步研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1999, **29**(1): 79~82.
Wang Jiading, Liu Yue. A further study on the mechanism of high-speed loess landslide in state of creeping and sliding liquefaction. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 1999, **29**(1): 79~82.
- [23] 金艳丽, 戴福初. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1493~1499.
Jin Yanli, Dai Fuchu. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1493~1499.
- [24] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 530~540.
Zhang Maosheng, Li Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 530~540.
- [25] Wang Fawu, Sassa K. Landslide simulation by a geotechnical model combined with a model for apparent friction change. Physics and Chemistry of the Earth, 2010, **35**(3-5): 149~161.
- [26] 张克亮. 滑坡运动学模型及其应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
Zhang Keliang. Study on the Kinematical Model and Its Application for Landslide Movement. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [27] 代云霞, 殷坤龙, 汪洋. 滑坡速度计算及涌浪预测方法探讨[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增): 407~411.
Dai Yunxia, Yin Kunlong, Wang Yang. Discussion on method of landslide velocity calculation and surge prediction. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(s): 407~411.