

文章编号: 1008-2786-(2017)6-835-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000284

浅层蠕动型黄土滑坡机理

沈 伟¹, 李同录^{1, 2*}, 张中华¹, 张国伟¹, 翟张辉¹

(1. 长安大学 地质工程系, 西安 710054;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心/国土资源部黄土地质灾害重点试验室, 西安 710054)

摘 要: 浅层蠕动型黄土滑坡通常呈面状发育于相对平缓的沟谷两侧, 沿黄土-基岩接触面产生周期性低速蠕动, 对附近的工厂、道路和管道等设施造成严重破坏。研究这类滑坡的形成机理对其防灾减灾工作具有重要的指导意义。因此本文以甘肃省天水市罗玉沟流域的一个典型浅层蠕动型黄土滑坡为例展开研究。取滑带泥岩样进行直剪和直剪蠕变试验, 以试验数据为基本参数, 利用 VB 编程的二维滑坡运动模型模拟该滑坡的演化过程, 并分析了滑坡在运动过程中及河流侵蚀下的稳定性。结果表明, 泥岩应力-应变曲线呈弱硬化型, 破坏后强度不发生衰减, 且其长期强度 ($\varphi_{\infty} = 10.3^{\circ}$ 、 $c_{\infty} = 12.8 \text{ kPa}$) 明显低于直剪试验强度 ($\varphi_f = 11.9^{\circ}$ 、 $c_f = 40.9 \text{ kPa}$), 有利于滑坡发生蠕动; 滑坡演化过程中后缘滑体逐渐向前缘蠕动, 滑体稳定系数随之提高, 但河流侧蚀又会明显降低其稳定性, 导致周期性蠕下滑; 本文采用的二维滑坡运动有限差分模型可较好的模拟这类滑坡的演化过程, 可为滑距预测提供依据。

关键词: 浅层蠕动型黄土滑坡; 蠕变试验; 长期强度; 运动模拟; 稳定性分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

蠕动型滑坡也称低速缓动滑坡^[1], 在黄土地区, 这类滑坡通常由浅表层黄土沿黄土-基岩接触面发育形成, 因此本文也称之为浅层蠕动型黄土滑坡。根据发育类型对黄土滑坡进行分类^[2], 包括错落式滑坡、高速远程滑坡、滑坡泥流和低速蠕动滑坡等四类。其中, 浅层蠕动型黄土滑坡属于第四类, 具有滑速低、滑距小、周期性运动的特点。在遭受降雨、前缘水流冲刷或人工开挖等作用时, 这类滑坡往往产生复活滑动。也有一些滑坡常年处于缓慢蠕滑状态, 在雨季时蠕滑速度加快^[3]。相对于高速远程滑坡等突发型的灾难性滑坡, 蠕动型滑坡一般不会造成重大的人员伤亡, 但在滑坡长期蠕滑作用下, 位于滑坡体上和坡脚的工厂、道路以及输油管道等设

施仍会遭受严重的破坏^[4, 5]。

由于浅层蠕动型黄土滑坡长期蠕滑变形的特点, 在对其进行稳定性评价时, 宜采用蠕变试验得到的长期强度参数, 若采用常规试验参数则会过高地估计其稳定性。过去的研究表明^[6, 7], 土体蠕变对边坡的长期稳定性具有显著影响。随着时间推移, 土质边坡稳定性会逐渐降低。因此在进行滑坡的长期稳定性分析和滑移时间的预测时, 有必要研究滑带土强度的时间效应^[8]。但也正因为这种滑坡的运动形式为蠕滑, 一些应用较广的滑坡运动模型, 如佐佐恭二 (Sassa)^[9] 的 LS-Rapid 模型以及麦克道格尔 (McDougal) 和汉格尔 (Hungar)^[10] 的 DAN^{3D} 模型并不适用于这种滑坡的运动模拟。基于这种认识,

收稿日期 (Received date): 2016-08-13; **改回日期** (Accepted date): 2017-07-07

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41502286); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2014CB744701) [National Natural Science Foundation of China (41502286); National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2014CB744701)]

作者简介 (Biography): 沈伟 (1993-), 男, 湖北仙桃人, 博士研究生, 主要研究方向: 山地地质灾害 [Shen Wei (1993-), male, born in Xiantao City, Hubei Province, Ph.D. candidate, research on geo-hazard in mountainous area] E-mail: shenweichd@qq.com

*** 通信作者** (Corresponding author): 李同录 (1965-), 男, 教授, 研究方向为非饱和黄土力学 [Li Tonglu (1965-), male, professor, mainly engaged in unsaturated loess mechanics.] E-mail: dedgx08@chd.edu.cn

本文提了一种基于速度折减法的有限差分模型,用以模拟这类滑坡的演化过程。

本文以甘肃省天水市罗玉沟流域的一个典型浅层蠕动型黄土滑坡为例展开研究。在滑坡区取原状泥岩样进行直剪试验和直剪蠕变试验,根据试验数据和实测地形,分析了滑坡在遭受河流侵蚀前后的稳定性,并利用自编的 VB 程序模拟了该滑坡的演化过程。通过室内试验和数值模拟,揭示了该滑坡的形成机理。

1 滑坡概况

甘肃省天水市地形上为山间河谷盆地(105.725°E,34.580°N),沿沟谷两岸发育了大量黄土-泥岩接触型滑坡^[5,11]。本文研究的滑坡位于天水市罗玉沟流域下游右岸,是该地区一个典型的浅层蠕动型黄土滑坡。滑坡全貌如图1所示。滑坡整体形态为后壁窄、前缘宽的马蹄形,前缘紧邻罗玉沟河道;滑坡相对周围地形下错,后壁及侧壁清楚,后壁高约30 m,左右侧壁高约20 m;滑坡体中部有冲沟发育,为一古滑坡。据当地居民介绍,该滑坡近期仍有蠕动迹象,滑体上的居民已搬迁,说明该滑坡处于欠稳定状态。滑坡是由罗玉沟侧向侵蚀冲刷坡脚而形成,在洪水期,滑坡前缘阻滑段土体遭到洪水侵蚀,导致其周期性的蠕动下滑。

根据现场勘查和实测地形,绘制滑坡的主剖面图,如图2所示,主剖面位置见图1。由图2可知,滑坡区地层主要为第三系(N_2)泥岩与披覆在斜坡表层的 Q_3 黄土;滑体物质主要为 Q_3 黄土;泥岩倾向为 280° 、倾角为 25° ,剖面处滑体水平长度约为

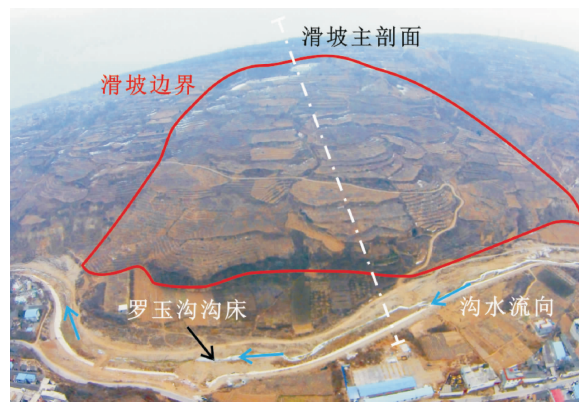


图1 罗玉沟滑坡全貌

Fig. 1 Landscape of the Luoyugou Landslide

700 m,垂直高差为162 m,平均倾角约为 13.3° ;滑面前缘缓、后缘陡;在滑动前,滑体后缘厚、前缘薄,滑动后变为前缘厚、后缘薄的形态。从滑面形态上来看,该滑坡阻滑段主要位于坡度平缓的前缘,而且紧邻罗玉沟沟床,在行洪期易受河水侵蚀。河流侧蚀作用会减小滑坡阻滑段长度,从而降低滑坡的稳定性,可能导致滑坡再次发生滑动。

2 滑坡区岩土物理力学性质

为获取滑带土强度参数,取黄土与泥岩接触面处的原状泥岩样进行直剪试验和直剪蠕变试验,直剪试验用于获取滑带土的峰值强度指标,直剪蠕变试验用于确定滑带土的长期强度指标。

现场调查发现,该滑体沿泥岩面下滑,滑带为厚1~2 m的强风化泥岩,裂隙较为发育。强风化泥岩下部相对黄土为隔水层,导致该部分泥岩在天然状态下也处于饱和状态。因此本文采用饱和泥岩样进

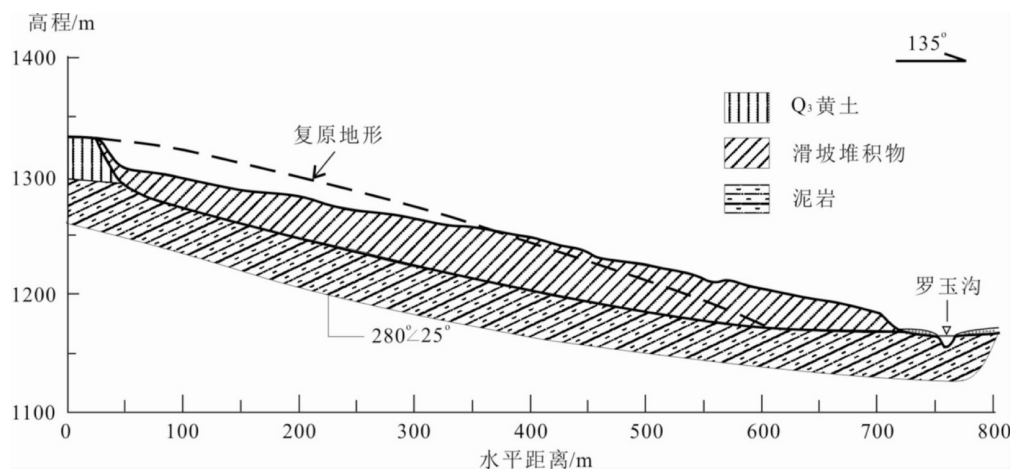


图2 罗玉沟滑坡主剖面图

Fig. 2 Profile of the Luoyugou Landslide

行固结快剪直剪试验,使试样分别在 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 的法向压力下固结,然后快剪得到其强度线,如图 3 所示。饱和泥岩峰值摩擦角 $\varphi_f = 11.9^\circ$,峰值粘聚力 $c_f = 40.9$ kPa。饱和泥岩应力应变曲线如图 4 所示。试验结果表明,滑带强风化泥岩应力应变关系为弱硬化型,各级固结压力下泥岩破坏后的强度均不发生衰减,峰值强度与残余强度基本相等。这种应力-应变关系意味着滑坡启动后抗滑力保持不变,且与下滑力大致相等,导致滑体加速度小、运动速度慢,并以蠕动的方式发生运动。

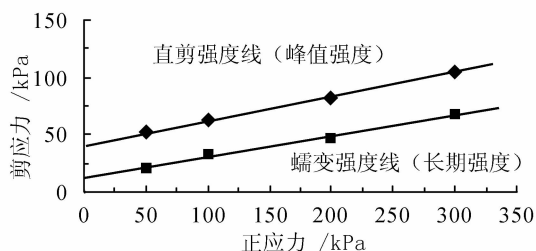


图3 泥岩强度线

Fig. 3 Failure line of the mudstones

获取土体长期强度常用的方法包括过度蠕变法^[12]和等时曲线法^[13]。其中,采用过度蠕变法确定土体长期强度时,只有在应力级较小时才能获得满意的精度,实际试验中难以操控。因此本文采用

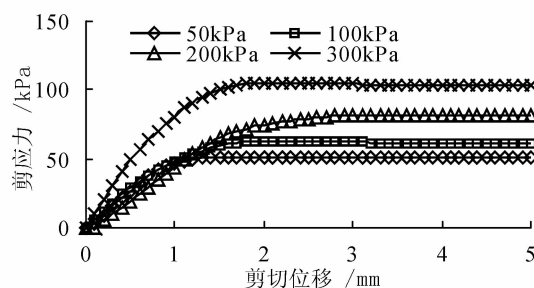


图4 饱和泥岩应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of the saturated mudstones

相对简单的等时曲线法来获取泥岩长期强度。等时曲线法通过建立不同时刻不同固结压力下的一组应力-应变关系曲线来确定土体的长期强度。随蠕变时间增长,这组应力应变等时曲线的拐点趋近极限剪力值,该值即当前固结压力下土体的长期强度极限值。为了获取泥岩应力应变等时曲线,取原状泥岩样饱和进行直剪蠕变试验。使试样分别在 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 的法向压力下固结,并采用分级加载的方式施加剪切荷载。固结压力为 50 kPa 和 100 kPa 时剪力增量为 10 kPa,固结压力为 200 kPa 和 300 kPa 时剪力增量为 20 kPa,每级荷载保持 3~4 天,然后施加下一级荷载,直至试样出现快速剪切破坏为止。根据蠕变试验数据,绘制泥岩应力应变等时曲线,如图 5 所示。由图 5,得

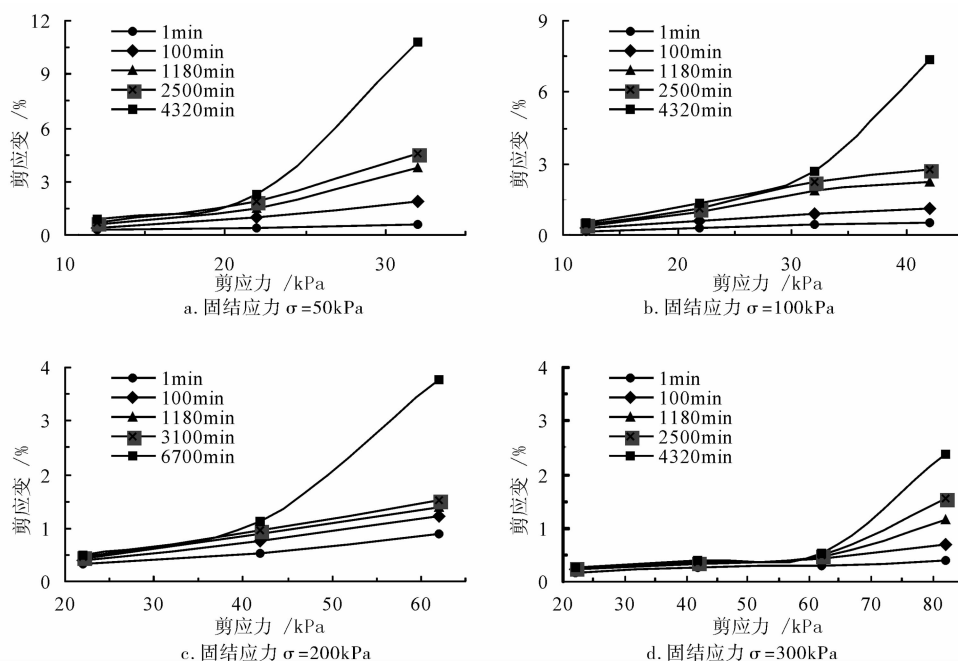


图5 泥岩蠕变全过程曲线

Fig. 5 Total process curve of creeping deformation of the mudstones

到 50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 的法向固结压力对应的长期抗剪强度分别为 21 kPa、33 kPa、47 kPa 和 68 kPa,并据此作饱和泥岩的长期强度线,如图 3 所示。由长期强度线,得到饱和泥岩长期摩擦角 $\varphi_{\infty} = 10.3^{\circ}$,长期粘聚力 $c_{\infty} = 12.8$ kPa,可见泥岩的长期强度较峰值强度有显著降低。

3 滑坡演化过程分析

由于滑坡滑带土的强度不发生衰减,而且地势平缓,决定了其为蠕动型滑坡。因此虽然滑带土的长期强度较低,也不可能产生高速下滑。不同于高速远程滑坡,本文研究的浅层蠕动型滑坡的运动过程极其漫长,无法用显示的时间描述这种形式的运动。缓慢蠕动滑坡的运动过程可看作是一种极缓慢的流动,其运动过程始终处于动态和静态之间,可称其为准动态过程。为此,本文提出了一种在传统有限差分方法中加入速度折减系数的方法,以描述这种准动态问题。

将滑坡体概化为固定滑床和可运动滑体组成的双层结构,并在欧拉坐标系下将滑体划分为土条,任取一土条进行受力分析,根据滑体的质量守恒和动量守恒关系,可得到二维滑坡运动模型控制方程见式(1)、(2):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \left(\frac{\sin 2\theta}{2} - \cos^2 \theta \tan \varphi \right) + kg \left(\cos^2 \theta + \frac{\sin 2\theta \tan \varphi}{2} \right) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{c}{\gamma} \quad (2)$$

式中: h 为滑体厚度; v 为滑体速度; c 为粘聚力; φ 为摩擦角; γ 为滑体重度; k 为侧压力系数,取 $k = 1 - \sin \varphi$; θ 为滑面倾角。在各参数中, h 和 v 为描述滑坡运动过程的基本参数,是待求解的未知量; c 、 φ 和 γ 为物理力学试验测得的参数; θ 为实测地形数据。

式(1)为连续性方程,表示滑体间的质量守恒关系,式(2)为动量方程,表示滑体的动量守恒关系,式左为滑体加速度,式右为重力、侧压力以及滑带阻力对加速度的影响。在建立上述模型时,本文采用以下两点假设:1)对任意土条,其速度方向与土条处滑面平行,因此滑体不脱离滑面也不嵌入滑面,在垂直滑面方向合力为 0;2)滑体为均质各向同性体,运动过程中土条间的侧压力系数、滑体重度、摩擦系数等均为常数。

为了获取滑体的运动过程,本文采用有限差分

的方法来求解上述偏微分方程。具体方法如下,对式(1)、(2)进行有限差分,得式(3)、(4):

$$\frac{h_i^{s+1} - h_i^s}{dt} + \frac{(v_{i+1}^s + v_{i+1}^{s+1})h_{i+1}^s - (v_i^s + v_i^{s+1})h_i^s}{2dx} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{v_i^{s+1} - Sv_i^s}{dt} + \frac{(v_i^s + v_i^{s+1})(v_{i+1}^s - v_{i-1}^s)}{4dx} \\ & = g \left(\frac{\sin 2\theta_i}{2} - \cos^2 \theta_i \tan \varphi_i \right) + \\ & kg \left(\cos^2 \theta_i + \frac{\sin 2\theta_i \tan \varphi_i}{2} \right) \frac{h_{i+1}^s - h_{i-1}^s}{2dx} - \frac{c_i}{\gamma} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: S 为速度折减算子,取值在 0 到 1 之间; dx 为节点间距; dt 为时间步长; i 为节点编号; s 为为时间步。

在式(3)、(4)中,对时间项采用向前差分法,对空间项采用中心差分法。式(4)说明,滑体下一时步的速度由上一时步的继承速度(Sv_i^s)和加速度增量两部分组成。速度折减算子 S 的意义在于,滑坡在下一时步时仅继承上一时步速度的 S 倍,且每个时步速度均进行 S 倍的折减。当 $S=0$ 时,每个时步的运动仅与当前时步的加速度有关,动能在蠕动过程中完全消耗,为纯静态分析;而当 $S=1$ 时,上一时步的速度得到完全继承,动能不因蠕动发生损失,为纯动态分析; S 介于 0 和 1 之间时则为准动态分析,蠕动消耗部分动能。按此方法计算,可在一定程度上反映滑坡的蠕动特点。在上述差分方程的基础上,用 VB 语言编程计算滑坡的运动过程,程序流程图如图 6 所示。为使滑坡运动过程尽可能接近蠕动,而且要求计算量不过大,经调试本文采用 $S=0.6$ 。模拟中强度参数采用上述长期强度,时步采用 $dt=0.02$ s。

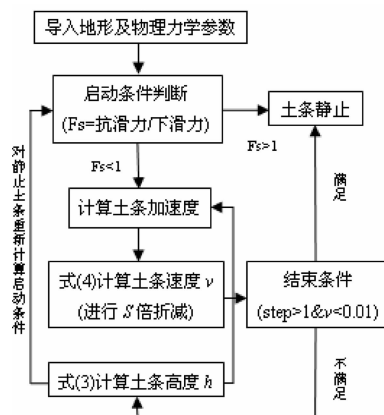


图 6 程序流程图

Fig.6 Flow chat of the program

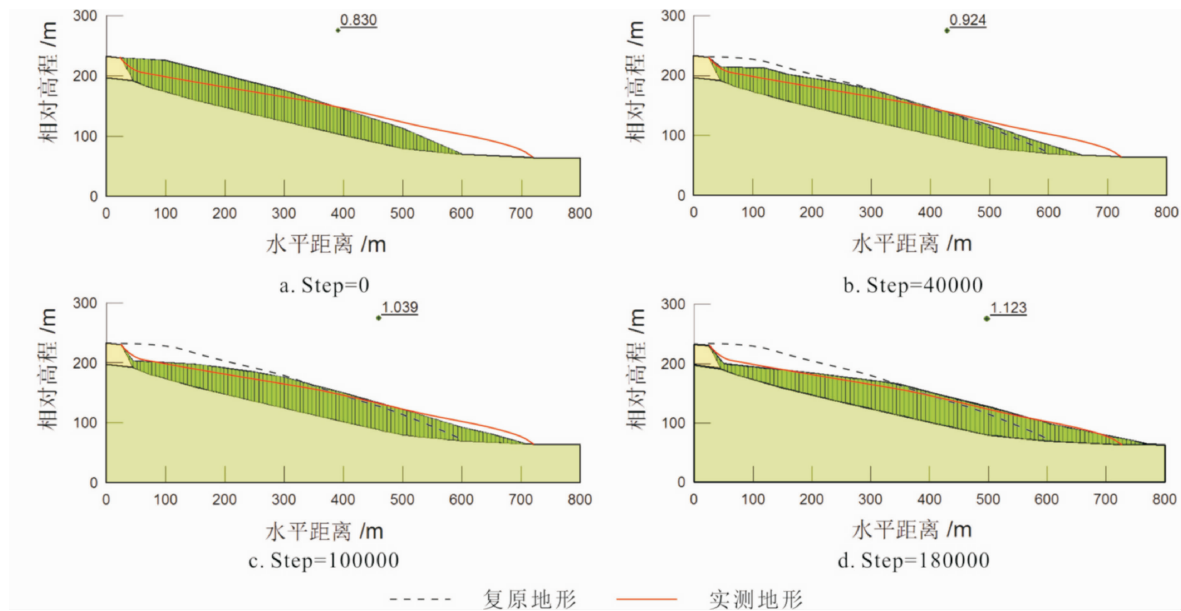


图7 不同步滑坡形态与稳定性

Fig. 7 Side views of the landslide at different time steps and its stability

根据模拟得到的地形数据,分析不同时步滑坡的稳定性,所用参数见表1,模拟结果见图7。图7中的稳定系数为采用长期强度参数和摩根斯坦-普瑞兹(Morgenstern-Price)法的分析结果。随着滑坡向前运动,滑坡形态发生变化,逐渐由后缘厚、前缘薄的形态向前缘厚、后缘薄转化,同时滑坡稳定性也逐渐提高。初始状态滑坡稳定系数最小,为0.830;40000步时,滑距为65 m,稳定系数上升到0.924;100000步时,滑距为100 m,稳定系数为1.039;180000步时运动基本停止,滑距为165 m,稳定系数为1.123,滑体达到稳定状态。模拟得到的地形与实测基本一致,但由于滑坡蠕动到沟床时受河流侵蚀,实测滑坡滑距较模拟结果略小约25 m。滑坡稳定性现状如图8。滑坡目前的稳定系数比按模拟地形分析要低,为1.101,可见河流侧蚀对滑坡稳定性具有较为重要的影响。如果河流侧蚀加剧,滑坡有可能从目前的欠稳定状态再次失稳,形成周期性蠕滑。

表1 稳定性分析参数

Tab. 1 Parameters for stability analysis

强度指标	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$c(\text{kPa})$	$\varphi(^{\circ})$
直剪强度	18.0	40.9	11.9
长期强度	18.0	12.8	10.3

表2 稳定性分析结果

Tab. 2 Stability analysis results

选用参数	地形	Morgenstern-Price	Janbu
直剪强度	模拟	1.409	1.392
	现状	1.381	1.361
长期强度	模拟	1.123	1.110
	现状	1.101	1.085

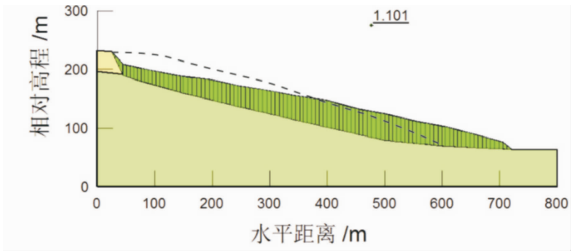


图8 滑坡稳定性现状

Fig. 8 Current stability factor of the landslide

分别采用直剪试验强度参数和长期强度参数分析滑坡稳定性,分析结果见表2。由表可知,无论对于Morgenstern-Price法还是简布(Janbu)法,用直剪试验强度确定的滑坡稳定系数较长期强度确定的稳定系数大0.28左右,说明用直剪试验强度过高的估计了滑坡的稳定性,不符合滑坡现状。因此在对这类滑坡进行稳定性分析时应采用长期强度。

4 结论

本文以浅层蠕动型黄土滑坡的形成机理为研究目标,并以罗玉沟流域的一个典型滑坡为例展开研究。通过直剪蠕变等试验研究了该类滑坡滑带土的蠕变性质,进行数值模拟分析了这类滑坡的成因机理,得出以下几点结论:

(1)浅层蠕动型黄土滑坡滑带土破坏后强度不发生衰减,且滑坡区地形平缓,决定了其运动类型为蠕动。虽然这类滑坡滑带土的强度较低,但由于势能无法有效的转化为动能,就不可能发育为高速滑坡。

(2)直剪试验和剪切蠕变试验结果表明,对浅层蠕动型滑坡,其滑带土的长期强度较直剪强度显著降低。在评价其稳定性时采用峰值强度会得到不正确的结论,应采用长期强度。

(3)本文采用的运动模型基于速度折减的有限差分法,该模型较好的反映了浅层蠕动型黄土滑坡的演化过程。对罗玉沟滑坡的模拟结果表明,该滑坡的滑体形态由最初前缘薄、后缘厚逐渐过渡为目前前缘厚、后缘薄的堆积形态,符合浅层蠕动型滑坡的运动特点。

(4)滑坡稳定性分析结果表明,河流侵蚀对稳定性有较大影响。对已经处于欠稳定状态的滑坡,河流侧蚀会使滑坡阻滑段长度减小,导致滑坡再次失稳。河流侧蚀作用具有周期性,在长期循环的侵蚀作用下滑坡运动也具有周期性。

致谢:感谢阴晓冬在野外测量地形上对本文做出的贡献,同时感谢李萍博士对本文英文摘要进行润色和修改。

参考文献 (References)

- [1] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社, 1995: 105-130 [HU Guangtao. Landslide dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 105-130]
- [2] 李同录, 龙建辉, 李新生. 黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 500-505 [LI Tonglu, LONG Jianhui, LI Xinsheng. Types of loess landslides and methods for their movement forecast [J]. Journal of Engineering Geology,

- 2007, 15(4): 500-505]
- [3] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 36-40 [WU Weijiang, WANG Lianqin. Basic types and active features of loess landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2002, 13(2): 36-40]
- [4] 张秉文, 胡敏. 铜川铝厂滑坡动态特征及趋势预测[J]. 灾害学, 1987, 4: 73-80 [ZHANG Binwen, HU Min. Tendency prediction and dynamic features of aluminum plant landslide in Tongchuan [J]. Journal of Catastrophology, 1987, 4: 73-80]
- [5] 孟兴民, 续永厚, 郭涛, 等. 天水市椒树湾、泰山庙滑坡研究[J]. 甘肃省科学院学报, 1991, 3(2): 36-44 [MENG Xingming, XU Yonghou, GUO Tao, et al. Research of Jiaoshuwan and Taishanmiao landslides in Tianshui City [J]. Journal of Gansu Science, 1991, 3(2): 36-44]
- [6] ZISCHINSKY U. On the deformation of high slopes [J]. Monthly Weather Review, 1966, 37(1): 11
- [7] SKEMPTON A W. long-term stability of clay slopes [J]. Géotechnique, 1964, 14(2): 77-102
- [8] 王祥秋, 高文华, 杨林德, 等. 边坡滑移面软弱夹层时间效应与相关特性的试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(1): 65-68 [WANG Xiangqiu, GAO Wenhua, YANG Linde, et al. The non-linear hereditary creep equation and the related characteristics analysis for interacted weak layer of slide-plane [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2002, 17(1): 65-68]
- [9] SASSA K. Geotechnical model for the motion of landslides [C]. In: Proceedings, 5th International Symposium on Landslides, 1988, 26(2): 37-56
- [10] MCDUGALL S, HUNGR O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1084-1097
- [11] 贾桢. 天水某黄土——红层接触面滑坡形成机理及其演化过程[D]. 兰州大学, 2013: 15-21 [JIA Zhen. The formation mechanism and evolution process of loess—red beds interface landslide in Tianshui area [D]. Lanzhou University, 2013: 15-21]
- [12] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社, 1994: 194-195 [LIU Xiong. Introduction to rheology of rock [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 194-195]
- [13] 沈明荣, 湛洪菊. 2010. 红砂岩长期强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 32(11): 3301-3305 [SHEN Mingrong, CHEN Hongju. Test study on long-term strength characteristics of red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(11): 3301-3305]

Formational Mechanism of Shallow Creeping Loess Landslides

SHEN Wei¹, LI Tonglu^{1,2}, ZHANG Zhonghua¹, ZHANG Guowei¹, ZHAI Zhanghui¹

(1. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area of Ministry of Land and Resources,

Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

Abstract: Shallow creeping loess landslides are widely developed on the relatively gentle slopes of gullies. These landslides creep periodically at a low speed along the contact surface between loess and bedrock, posing serious danger to infrastructures nearby, such as buildings, roads and pipelines. A better understanding of the formation mechanism of this sort of slope failure has great implication for geohazard control. The Louyugou landslide, located at the Luoyu gully in Tianshui, Gansu, was targeted as a case study for interpretation of the formation mechanism of shallow creeping loess landslides. Intact mudstone samples, collected from sliding belt of the slope, were tested for shear strength by using direct shear tests and direct shear creep tests. And then with the obtained test data as parameters, simulation of 2 dimensional loess surface flow was performed and slope stability analysis was conducted by using a VB program based on Finite Difference Method. Results showed that the stress-strain behavior of mudstone was of weak strain hardening type. (i. e. yield stress of the mudstone increased slightly with plastic deformation development). The long-term strength values gained by direct shear creep tests ($\varphi_{\infty} = 10.3^{\circ}$, $c_{\infty} = 12.8$ kPa) were much lower than those determined by direct shear test ($\varphi_f = 11.9^{\circ}$, $c_f = 40.9$ kPa), which could be used for explanation of the creeping behavior to some extent. By simulation, it revealed that the rear body of the slope creeps forward gradually whereby relief changes over time, leading to an increasing stability. Nevertheless, the analysis also disclosed that the stability level would decrease significantly due to channel erosion, resulting in periodical downslope creeping, which was entirely consistent with our field observation. In conclusion, our proposed VB program could be used as a tool for assessment of landslide travelling distance.

Key words: shallow creeping loess landslides; creep test; long-term strength; run-out simulation; stability analysis