

文章编号:1671-8879(2007)02-0021-05

公路滑坡侵蚀运动过程的仿真分析

郑书彦^{1,2}, 李占斌^{2,3}

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 3. 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 为了研究公路滑坡运动的机理,减轻公路建设中滑坡灾害的影响,以陕西铜川—王石凹公路 2[#] 滑坡侵蚀为实例,论述了公路滑坡侵蚀的地质地貌条件和变形特征。认为 2[#] 滑坡为牵引式滑坡,是古滑坡的复活,2[#] 滑坡的滑移方式和方向与老滑坡不同,2[#] 滑坡处于非稳定状态。建立了地质模型和计算模型,采用离散元法对滑坡侵蚀运动过程进行了仿真分析,对该滑坡滑动后可能造成的灾害程度及侵蚀量进行了评估。结果表明:2[#] 滑坡的运动过程可分为:启动破坏阶段、剧动加速阶段、高速运动阶段、碰撞减速阶段和停滞缓动阶段 5 个阶段;2[#] 滑坡滑动后,潜在滑坡侵蚀量将达到 $1\,409 \times 10^4 \text{ m}^3$,因此该段公路必须进行滑坡治理或改道。

关键词: 道路工程; 滑坡侵蚀; 变形特征; 离散元; 仿真分析

中图分类号: U416.163

文献标志码: A

Simulation on moving process of landslide erosion in highway

ZHENG Shu-yan^{1,2}, LI Zhan-bin^{2,3}

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the mechanism of landslide movement and reduce landslide disaster in the construction of highway, the geological and physiognomic conditions and deformation behavior of the landslide were analyzed with the case of the 2[#] landslide erosion of Tongchuan-Wangshiao Highway. The 2[#] landslide which renewed from the old landslide was a pull-type landslide, while the slip style and direction of the 2[#] landslide varied from the old one and is in an unstable situation. The geological model and the calculating model was put forward. In addition, by using the discrete element method, the simulation analysis of the erosion movement process of the landslide was carried out, and the disaster degree and erosion amount caused by the landslide erosion movement were evaluated. The erosion movement process of the landslide could be divided into five periods, i. e., start-up phase, accelerating phase, high-speed movement phase, bumping-deceleration phase and stopping phase. Based on the results of landslide disaster evaluation, the potential landslide erosion caused by the movement of the 2[#] landslide of Tongchuan-Wangshiao Highway could reach $14\,090\,000 \text{ m}^3$, which means that the 2[#] landslide must be controlled or the portion of Tongchuan-Wangshiao Highway must be relocated. 1 tab, 7 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; landslide erosion; deformation behavior; discrete element; simulation study

收稿日期: 2005-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371075); 中国科学院知识创新重大项目(KCZX1-10-04)

作者简介: 郑书彦(1958-), 男, 甘肃宁县人, 副教授, 博士后, E-mail: zsyang@chd.edu.cn.

0 引言

公路沿线边坡破坏是一种常见的地质灾害,许多研究者做了大量的研究工作^[1-4],国外对滑坡的研究开展较早,取得了很多成果,中国的朱文彬等^[5-10]的研究表明,滑坡侵蚀受多种因素控制。本研究在现场调查、分析的基础上,对陕西铜川—王石凹公路 2[#] 滑坡的形成条件、影响因素、稳定性等进行了全面的分析研究,在此基础上利用离散元对滑坡滑动后的运动过程进行了模拟,将滑坡运动过程分为 5 个阶段,有一定的理论意义及应用价值。

1 地质地貌条件

陕西铜川—王石凹公路 2[#] 滑坡(以下简称 2[#] 滑坡)位于铜川市北关,雷家河的左岸。铜川—王石凹公路从 2[#] 滑坡体南边界进入,向北到达 2[#] 滑坡体中部后拐弯再向南东方向后,再折向东北方向行进,从 2[#] 滑坡后部边界穿出。2[#] 滑坡呈不规则的圈椅状,后缘略宽而前缘略窄,滑坡长约 610 m,前缘宽约 510 m,后缘宽约 590 m,总面积约 335 500 m²,平均厚度约 42 m,潜在滑坡侵蚀量将达到 $1\,409 \times 10^4$ m³。2[#] 滑坡侵蚀体是黄土地层,滑动面为二叠系泥页岩及其风化壳,滑动方向 281°,倾角 12°~15°。2[#] 滑坡后缘高程 928 m,前缘(雷家河河面)标高 873 m,前后缘相对高差 55 m。2[#] 滑坡是古滑坡的局部复活。

根据现场调查和钻孔资料表明,2[#] 滑坡区域地层结构从新到老为(图 1):①滑带土(Q₄^{del}),该滑坡的滑带是由二叠系泥页岩的风化壳组成,泥页岩的力学强度小,加上强风化状态,呈软泥状,力学性质极差,特别是遇水后强度明显减弱,厚约 0.3 m;②人工填土(Q₄^{mc}):黄色、黄褐色,主要为煤矸石、煤渣、碎砖等,结构疏松,不均一,密实程度甚低,孔隙

比大,为中高压缩性土,抗剪强度较小,厚度一般为 5.0~8.0 m;③砂质粘土(Q₄^{2del}),原为马兰黄土,发生滑动的 2[#] 滑坡侵蚀均发生在中上更新统黄土之内,由于滑体的影响,土体结构一般较松散,厚约 15 m;④粉质粘土(Q₄^{1del}),原为离石黄土,由于滑体的影响,土体结构较松散,厚约 10 m;⑤马兰黄土(Q₃^{col}),黄褐色,均质,结构疏松,可塑—软塑,其颗粒成分以粉粒为主,矿物成分主要为石英、长石,粘粒含量低,大孔隙、垂直节理发育,可见虫孔,含少量蜗牛壳和钙质结核,上部有植物根系,厚约 18 m;⑥离石黄土(Q₂^{col}),其颜色稍深于马兰黄土,呈深黄褐色,粘粒含量加大,结构较紧密,均质,含水量较低时坚硬,透水性较差,含有钙质结核层和数层古土壤,厚约 12 m;古土壤棕红色,具白色钙质斑点或斑块,呈块状,大孔隙发育,可见针状,含钙质结核,厚约 1~3 m;⑦二叠系泥页岩与砂页岩互层(P):页岩呈暗绿色、紫红色或黑灰色,薄层状构造,层理发育,中等或强风化,并呈碎屑状,厚为 1~2 m。泥岩呈褐红色、紫红色、灰色等杂色;本层力学性质极差,特别是遇水后力学强度明显减弱,二叠系顶部风化剥蚀的砂页岩,力学强度更差,其产状 340°∠9°~13°,为单斜地层;二叠系砂岩的泥页岩下部是硬度较大的白色、灰白色、灰绿色、棕红色砂岩,中细—粗粒结构,块状构造,钙质胶结,中厚层,层理发育,矿物成分为长石、石英。该地区二叠系地层主要是石干峰组、石盒子组、山西组,其产状 340°∠9°~13°,为单斜地层。岩石试验资料表明,该砂岩力学指标偏低,吸水率偏大,软化系数偏小,特别是饱和情况下,岩石力学强度显著降低,但该岩体仍可归为坚硬岩石。

2[#] 滑坡表面起伏不平,陡坎纵横交错,整体坡度较缓,在滑坡后缘有一反坡平台,宽约 3~5 m,近南北向延伸。滑坡的总体地形为东高西低,北高南低,呈阶状递降,陡坎呈新月状,前缘由于雷家河的侵蚀而变高变陡,坎高约 6~8 m。滑坡体上有大小多条冲沟,北、中、南 3 个冲沟较大,冲沟切割强烈,冲沟延伸方向均为东西向,后缘有陡崖。滑坡前缘鼓胀隆起明显,使前缘树木、电杆倾斜。2[#] 滑坡体的前缘和老滑坡体的前缘重合,滑坡舌位于雷家河左岸的坡脚,人工切挖坡脚及填土,使坡体前缘形成两道陡坎,高度 4~6 m,造成坡体前缘临空。2[#] 滑坡前缘发育两个小滑体,前缘挡墙护坡严重开裂,部分倾斜、倒塌。南侧边缘是一条小冲沟,冲沟中可见剪裂隙,后缘见高低错落的裂缝,裂缝走向南北,特别是两个小滑体后缘裂缝密集,最宽可达 50 cm。

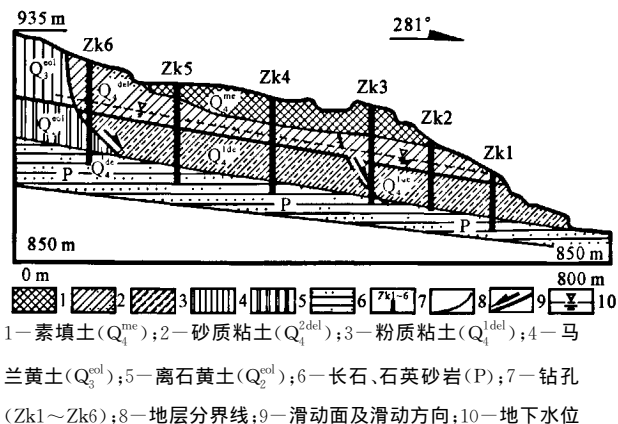


图 1 陕西铜川—王石凹公路 2[#] 滑坡侵蚀地质模型

雷家河两岸的黄土梁是本区地表水、地下水的分水岭。滑坡表面裂缝纵横,地表水极易下渗。由于钻孔位置不同,各孔稳定水位埋深 2.25~12.0 m。当雨水沿地表的各种裂隙入渗后,下渗水被二叠系顶部泥页岩阻挡形成向雷家河方向的径流,泥页岩遇水软化,抗剪强度急剧下降。

2 2# 滑坡侵蚀的变形特征

2# 滑坡的变形破坏明显,造成的损失很大。位于该处的劳保商店 1978 年始建,建成后就一直受到滑坡的干扰破坏。1982 年~1983 年由于降水量丰沛,2# 滑坡活动加剧,剪出口东侧的护墙局部被推倒,前缘的楼房出现细微的南北向裂缝,护墙及紫色泥岩顶端黄土滑出 5~6 cm,黄土水平滑移 0.5~1.0 m,劳保商店被迫废弃,直接损失达 30 多万元。油库北侧树木、高压线杆下滑并倾斜。雷家河河床原宽 6~8 m,由于滑坡前缘的移动使河床不足 2 m,河流堵塞,雷家河被迫改道。据此推测,滑坡复活以来,2# 滑坡的前舌主滑部位向前移动了 3~6 m。滑体表面农田产生许多裂缝错断,形成多级陡坎。2# 滑坡所在的斜坡由于雷家河的冲刷侵蚀使前缘变高变陡,坡体上雨水入渗抬高地下水位,导致前部土体崩塌与剥落,逐步牵引着后面的土体沿软弱结构面发生滑移,并在坡体上形成拉张裂隙,裂隙又成为后面坡体的临空面,使之向下滑动,前部牵引后部,从而发生整体移动,根据变形破坏特征可判断为牵引式滑坡。

2# 滑坡的发生是多种因素综合影响的结果:①人工活动,如开挖坡脚、采石放炮、公路机动车辆的振动等;②自然降水入渗软化滑带土,地下水产生浮托力、渗透压力;③黄土与二叠系泥页岩的不整合面上的风化壳的存在等。

3 滑坡侵蚀体运动的离散元分析

斜坡失稳破坏后的过程是一个运动学问题,对这一过程的模拟采用离散单元法进行,这种方法用来模拟散体介质的运动过程是非常有效的。

地质模型如图 1,用离散元来模拟 2# 滑坡滑面贯通后的运动过程,离散单元法单元的划分根据节理的自然切割状况确定。因此,本文根据黄土中实际最为发育的垂直节理面以及层面来划分单元及建立计算模型,如图 2 所示。滑坡体被这两组结构面分割成 297 个单元。滑体以下的滑床基岩部分作为固定单元处理,整个计算过程中不发生位移。

计算所需参数主要是节理和层面的力学特性指标,选取时主要考虑试验成果资料,但在计算过程中还要进行适当的调整,使得计算成果更符合实际情况,调参对宏观机理的模拟是必须的。2# 滑坡的两组节理面参数值选取:接触摩擦系数 0.25;接触法向刚度 600 MPa/m;接触切向刚度 50 MPa/m;节理摩擦系数 0.58(30°);节理法向刚度 1 900 MPa/m;节理切向刚度 190 MPa/m;节理内聚力 0;滑坡体重度 17.5 kN/m³;滑带土重度 15.5 kN/m³;滑床重度 23.2 kN/m³。

根据建立的力学模型,对 2# 滑坡进行了全过程的离散元数值模拟。模拟全过程共用了 1 102 115 个时间单位,理论上每个时间单位为 0.87×10^{-5} s,整个迭代过程理论历时 95.88 s,模拟结果如图 3~图 7 所示。



图 2 计算模型、运动初始状态



图 3 启动破坏阶段末滑体运动状态



图 4 剧加速阶段末滑体运动状态

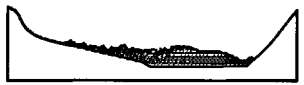


图 5 高速运动阶段末滑体运动状态



图 6 碰撞减速阶段末滑体运动状态



图 7 停滞缓动阶段末滑体运动状态

根据计算结果,整理出不同时刻滑坡体后缘、中部、前缘运动的运动轨迹、运动距离(线位移)、转角、合力、合力矩、形心位移、形心速度、速度和加速度等特征,将滑坡侵蚀体各演化阶段的运动距离、速度和加速度列于表 1。

根据模拟计算结果,可将 2# 滑坡的运动过程划分为 5 个阶段:

(1)0~7 000 时步,历时 0~0.44 s,启动破坏阶段。在滑体重力的作用下,滑体沿着中前部的泥岩夹层产生蠕变,使应力不断在锁固段集中,导致锁固段渐进性破坏,锁固段越来越短,滑坡中前部开始移动,拖动滑坡中后部滑移,滑面迅速向中后部扩大,最终使得滑面贯通破坏,滑体整体向下、向前开始移动。该时段平均速度 0.394 m/s,平均加速度 0.730 m/s²,加速度较大,速度较小,说明这一阶段滑坡正处于启动阶段。

表 1 离散元计算结果

滑坡侵蚀体 演化阶段	时步/步	历时/s	后缘运动距离		中部运动距离		前缘运动距离		时 段 末 最大速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时段末最 大加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
			X/m	Y/m	X/m	Y/m	X/m	Y/m		
启动破坏阶段	1 000	0.09	0	0	0	0	5	-2	0.327 00	0.972 0
	3 000	0.26	0	0	0	0	13	-5	0.370 00	0.792 0
	5 000	0.26	0	0	16	-3	26	-10	0.299 00	0.709 0
	7 000	0.44	12	-5	32	-6	39	-15	0.578 00	0.446 0
剧动加速阶段	10 000	0.61	25	-10	48	-9	52	-20	0.911 00	1.645 0
	20 000	1.74	37	-15	55	-12	65	-25	1.994 00	3.844 0
	30 000	2.61	50	-20	80	-15	80	-30	3.883 00	4.183 0
	50 000	4.35	120	-40	140	-25	140	-40	1.990 00	1.702 0
	70 000	6.09	140	-55	180	-40	200	-40	1.842 00	1.518 0
高速运动阶段	100 000	8.70	170	-65	240	-50	260	-40	1.685 00	0.892 0
	125 000	10.88	200	-70	280	-60	320	-40	1.723 00	1.138 0
	150 000	13.05	250	-80	340	-80	360	-40	1.630 00	0.957 0
	175 000	15.23	290	-90	400	-90	410	-40	1.666 00	0.835 0
	200 000	17.40	350	-110	460	-100	490	-40	2.059 00	1.129 0
	230 000	20.01	400	-130	540	-120	540	-40	1.559 00	0.775 0
	260 000	22.62	460	-140	580	-120	600	-40	1.516 00	0.963 0
	300 000	26.10	520	-155	660	-120	650	-10	1.287 00	0.981 0
碰撞减速阶段	330 000	28.71	540	-160	690	-120	660	15	0.729 00	0.592 0
	360 000	31.32	550	-165	700	-120	680	20	0.608 00	0.749 0
	400 000	34.80	560	-180	730	-120	680	20	0.275 00	0.787 0
	450 000	39.15	600	-180	740	-120	680	20	0.351 00	0.419 0
停滞缓动阶段	500 000	43.50	600	-180	740	-120	680	20	0.061 00	0.303 0
	510 000	44.37	600	-180	740	-120	680	20	0.046 00	0.297 0
	600 000	52.20	600	-180	740	-120	680	20	0.022 00	0.106 0
	700 000	60.90	600	-180	740	-120	680	20	0.029 00	0.130 0
	800 000	69.60	600	-180	740	-120	680	20	0.067 00	0.166 0
	900 000	78.30	600	-180	740	-120	680	20	0.015 90	0.106 0
	1 000 000	87.00	600	-180	740	-120	680	20	0.015 60	0.092 0
	1 100 000	95.70	600	-180	740	-120	680	20	0.000 57	0.001 3
	1 102 115	95.88	600	-180	740	-120	680	20	0.000 26	0.000 2

(2)7 001~70 000 时步,历时 0.44~6.09 s,剧动加速阶段。由于滑坡面的突然贯通,锁固段变形中贮存的弹性应变能的释放产生的加速效应十分巨大,滑体获得一个很大的启程加速度,达到了加速度最高点峰,高达 4.183 m/s^2 ,产生了剧动加速现象,滑速也达到了最高点 3.883 m/s ,加速度的平均值也达到了各阶段的最高 1.842 m/s^2 ,加速度较大,速度较小。这一阶段的合力、合力矩相应也很大。

(3)70 001~300 000 时步,历时 6.09~26.10 s,高速运动阶段。在剧动加速的基础上,由于势动能的不断转化及惯性力的影响效应,滑坡高速运动引起滑床面上产生气垫效应,使得滑动面上摩阻力显著降低,滑体以高速度向前、向下运动,平均速度达到了

1.641 m/s ,而平均加速度仅有 1.159 m/s^2 ,加速度较小,而速度较大。这一阶段的合力、合力矩反而很小。

(4)300 001~450 000 时步,历时 26.10~39.15 s,碰撞减速阶段。滑坡侵蚀体高速运动过河谷后,到达对岸山体时,滑坡前缘碰撞到对岸的山坡而停止,速度迅速减弱变小,但在这一阶段初期速度还是较高,加速度较小。由于滑体巨大的冲力,是后部滑体向前部压密,各个滑块速度从前部向后部逐渐变小。由于减速需要能量的消耗,这一阶段的合力、合力矩反而变得很大。

(5)450 001~1 102 115 时步,历时 39.15~95.88 s,停滞缓动阶段。滑体由于能量的逐渐消耗,加速度虽然还较大,但速度还是越来越小,中前部滑体基本

上处于停滞状态,只有后部滑体还在运动,同时滑体在自重作用下产生压密作用,当滑坡能量消耗殆尽时,滑坡侵蚀体停止运动。这一阶段的合力、合力矩基本接近于0。离散元所模拟的是指滑坡彻底失稳后的运动过程,特别是预测其运动速度和破坏区范围,但目前该滑坡正处于缓动变形阶段。

4 结 语

(1)根据2[#]滑坡的变形破坏特征,可判断为牵引式滑坡,是古滑坡的复活;现场的调查表明,该滑坡处于不稳定状态。

(2)采用离散元法进行非线性数值分析,根据计算结果,可将2[#]滑坡的运动过程划分为:启动破坏阶段、剧动加速阶段、高速运动阶段、碰撞减速阶段、停滞缓动阶段5个阶段。

(3)2[#]滑坡滑动后,潜在滑坡侵蚀量将达到 $1409 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(4)2[#]滑坡滑动后,可能造成的灾害程度将相当严重,因此该路段必须进行滑坡治理或改道。

参考文献:

References:

- [1] 王文生,谢永利,梁军林.膨胀土路堑边坡的破坏形式和稳定性[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(1):20-24.
WANG Wen-sheng, XIE Yong-li, LIANG Jun-lin. Classification of expansive clay slope on road cutting [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 20-24.
- [2] 王根龙,门玉明,陈志新,等.土坡稳定性塑性极限分析条分法[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(4):28-30.
WANG Gen-long, MEN Yu-ming, CHEN Zhi-xin, et al. Plasticity limit analysis on soil slope stability by slice techniques[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(4): 28-30.
- [3] 张国祥,刘宝琛.边坡滑动面三维空间有限元分析[J].中国公路学报,2003,16(4):25-29.
ZHANG Guo-xiang, LIU Bao-chen. Analysis of slope slip surface by three-dimension finite element method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 25-29.
- [4] 聂跃高,刘伟全,施建勇,等.加速遗传算法在路堤边坡稳定性分析中的应用[J].中国公路学报,2003,16(4):16-20.
NIE Yue-gao, LIU Wei-quan, SHI Jian-yong, et al. Application of accelerating genetic algorithm for embankment slope stability analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 16-20.
- [5] 朱文彬,刘宝琛.降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):509-512.
ZHU Wen-bin, LIU Bao-chen. Forming and development process of soil landslide during rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 509-512.
- [6] 郑书彦.滑坡侵蚀及其动力学机制与定量评价研究[D].北京:中国科学院,2002.
- [7] 郑书彦,李占斌,李习安.宝塔山滑坡侵蚀有限元分析[J].水土保持学报,2002,16(1):113-116.
ZHENG Shu-yan, LI Zhan-bin, LI Xi-an. Analysis on slope erosion of Baota mountain by finite element method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 113-116.
- [8] 张作辰.滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J].工程地质学报,1996,4(4):80-85.
ZHANG Zuo-chen. Mechanism of groundwater effect landslide stability and control construction [J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(4): 80-85.
- [9] 殷坤龙,汪 洋,唐仲华.降雨对滑坡的作用机制及动态模拟研究[J].地质科技情报,2002,21(1):75-78.
YIN Kun-long, WANG Yang, TANG Zhong-hua. Mechanism and dynamic simulation of landslide by precipitation[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1): 75-78.
- [10] 谢守益,徐卫亚.降雨诱发滑坡机制研究[J].武汉水利电力大学学报,1999,32(1):21-23.
XIE Shou-yi, XU Wei-ya. Mechanism of landslides induced by precipitation [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1999, 32(1): 21-23.