

边坡开挖诱发滑坡离散元模拟

段 钊¹,唐 皓²,党 琪³,赵法锁²,林鸿州²

(1. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;
3. 西安科技大学 教务处,陕西 西安 710054)

摘 要:为直观反映滑坡从形成到变形、破坏的全过程,以边坡开挖诱发的大黄公路 1 号滑坡为例,在现场调查的基础上,结合室内试验结果,以预测其形成机制和致灾范围。采用离散元模拟技术,根据滑坡工程地质特征建立原始边坡模型,并对边坡开挖前、后 2 个阶段进行离散元模拟。通过对滑坡及跟踪点运动过程、速度和加速度变化的分析,判断该滑坡目前处于蠕滑滑动阶段、稳定性差。研究结果表明:大黄公路 1 号滑坡是由边坡开挖引起的以水平方向运动为主的牵引式滑坡;滑坡的运动过程可分为低速蠕滑、高速滑移、减速缓动和自稳调整 4 个阶段;滑坡若失稳,将对公路来往车辆、行人造成威胁,最大威胁距离达 41.3 m,公路上的滑坡堆积体可达 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,将严重影响公路的正常运行。

关键词:道路工程;边坡;滑坡;离散元数值模拟;变形运动机制

中图分类号:U416.14 **文献标志码:**A

Discrete element simulation of landslide induced by slope excavation

DUAN Zhao¹, TANG Hao², DANG Qi³, ZHAO Fa-suo², LIN Hong-zhou²

(1. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. Dean's Office, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reflect the whole process of the landslide from deformation to failure, this paper took No. 1 landslide on Dahuang highway which is introduced by slope excavation as an example to predict its formation mechanism and hazard range based on field investigation and laboratory test results. The discrete element numerical simulation method is used to simulate the previous and later stage of excavation slope model according to the landslide engineering geological characteristics. The analyses of movement, velocity and acceleration of the landslide and trace points in the model show that No. 1 landslide on Dahuang highway is currently in the stage of creep sliding with poor stability. The results show that No. 1 landslide on Dahuang highway is a retrogressive landslide in the horizontal direction, which is mainly induced by slope excavation. And the evolution process of landslide can be divided into the following four stages, low-speed creeping stage, high-speed moving stage, deceleration slow-moving stage and self-stabilizing stage. The results also reveal that the landslide will pose a threat to the vehicles and pedestrians on the highway, and the greatest threat distance is up to 41.3 m. While the volume of landslide

on the highway is up to $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, it will seriously affect the normal operation of the highway.

3 tabs, 11 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; slope engineering; landslide; discrete element numerical simulation; deformation and movement mechanism

0 引言

边坡开挖诱发滑坡已成为中国公路、水电等工程项目建设中的常见问题,许多学者从不同方面进行了大量研究,在数值模拟方面取得了一定成果。张斌等利用大变形有限元法对高速公路泥岩边坡变形失稳破坏进行了模拟,并对其影响因素进行了分析^[1];兰智雄等以某开挖深路堑为例,利用 ANSYS 模拟软件对边坡稳定性进行了分析^[2];漆祖芳等采用 EVP 软件,利用弹塑性有限元法对大岗山水电站开挖边坡稳定性进行了计算,揭示了边坡可能的失稳部位^[3];冯文娟等利用 FLAC 软件,对某滑坡不同工况下治理前、后稳定性进行了模拟计算^[4]。

以上数值研究方法都基于有限元和有限差分法,适合采用连续介质作为出发点,往往受限于小变形的假设,对于含有众多不连续面的岩质边坡大变形动力分析具有很大的局限性。离散元法(DEM)属于块体理论数值方法,其基本特征在于允许有限位移和各离散块体发生平动、转动、甚至相互分离,弥补了有限元法或边界元法对介质连续和小变形的限制,特别适合具有节理结构和块裂介质的不连续变形及破坏问题的分析,不少学者利用该方法对滑坡的形成及运动机制进行了模拟,并取得了较为满意的效果^[5-7]。基于此,本文以大黄公路 1 号滑坡为例,建立滑坡概化模型,采用静力开挖方案,运用离散元软件 2D-Block 对开挖条件下边坡变形破坏及运动机制进行了初步分析研究。

1 滑坡概况

大黄公路是引汉济渭三河口水利枢纽(佛坪县大河坝镇)通往黄金峡水利枢纽(洋县黄金峡镇)的主干公路。1 号滑坡位于大黄公路佛坪段 K2+500~K2+750 与西汉(西安—汉中)高速交界处,原斜坡地形为基岩凸嘴,2010 年 4 月大黄公路拓宽改造,在原边坡基础上内扩 10 余米。受开挖、降雨及地下水等因素影响,坡体 2011 年 6 月陆续出现变形,形成滑坡。

该滑坡平面形态成扇形,主轴方向长约 33 m,宽约 76 m,厚约 20 m,坡度约 65° ,体积约 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。目前,滑坡前缘发生 1 处小型滑塌,后缘出现 6 条近

平行的弧形裂缝,整体未发生大规模滑移。钻孔资料显示,滑动面基本呈折线形,前缘滑动面为中、强风化层接触面,与地下水位置接近,后缘滑动面处于强风化层内部,如图 1 所示。从钻孔中提取滑带位置岩样,发现滑带厚约 25 cm,其岩体破碎,含水量大,强度低,用手轻掰即碎。

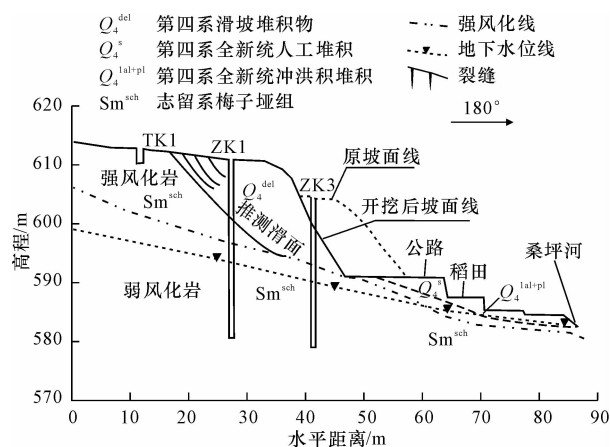


图 1 滑坡工程地质剖面

Fig. 1 Geological section of landslide engineering

裸露基岩为志留系梅子亚组薄~中层云母片岩,产状为 $40^\circ \angle 70^\circ$ 。坡体发育 3 组节理:节理组 J_1 产状为 $45^\circ \angle 60^\circ$, J_2 产状为 $110^\circ \angle 55^\circ$, J_3 产状为 $130^\circ \angle 49^\circ$,其中 J_1 最发育, J_2 、 J_3 发育较差(见下页图 2)。裂隙间距 10~50 cm,延伸数 10 cm 至 10 余米不等,贯通性较好。从目前调查结果来看,滑坡的软弱面与层面以及节理裂隙的不良组合将成为控制滑坡失稳的关键,并决定着滑坡的发育及破坏方式。

根据现场调查结果,结合室内试验提供的强度参数,采用折线滑动法分别计算开挖前、后坡体的稳定性,结果显示:开挖前,稳定系数 $k=1.23$;开挖后,稳定系数 $k=1.04$ 。由此可知,开挖后边坡处于临界状态,稳定性差,若遇暴雨、地震等触发因素,该滑坡会加速发育以至整体滑动。

2 离散元数值模型

2.1 离散元数值模型的建立

根据 1 号滑坡地质剖面图建立概化模型,如下页图 3 所示,模型底边宽 103 m,左侧边界高程为 617 m,右侧边界高程 586 m。为便于计算,对坡体形

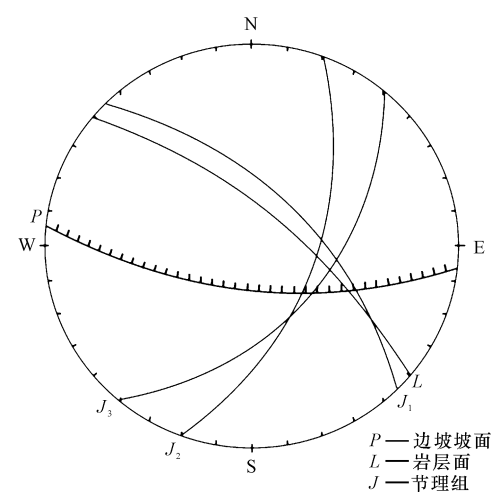


图 2 坡面、岩层面与节理组赤平投影
Fig. 2 Stereographic projection of bedding plane and joints in slope

态进行简化处理。将强风化线以上岩性统一划为强风化岩体,强风化线以下统一划为弱风化岩体;未变形区域强风化岩及弱风化岩指定为块体(区块①②)。滑体结构面的分割参考图 2 中 L 和 J_1 的产状,并根据坡面 P 的倾向进行投影转换,尺寸和疏密程度由原斜坡岩体的结构特征确定(见图 4)。滑带前端(区块

③)岩性设定为饱和岩体,后端(区块④)设定为强风化岩体;模型中布置跟踪点,用以跟踪滑坡在变形、破坏过程中的位移、速度及加速度等随时间的变化。

2.2 基本原理、接触模型及边界条件

2.2.1 基本原理

离散元法假设块体为准刚性体,每一块体都应满足平衡方程和本构方程。根据平衡方程,某一块体上会存在邻近块体通过边、角接触对它施加的一组力,这组力以及重力对块体的重心会产生合力 F 及合力矩 M ,如果合力和合力矩不为 0,则不平衡力和不平衡力矩使块体发生准规则运动,运动规律则依据牛顿第二定律 $F=ma$ 和 $M=I\beta$ (其中 m 为块体质量, a 为加速度, I 为转动惯量, β 为角加速度),显然块体的运动不是自由的,会遇到邻接块体的阻力。块体间的相互阻力将使块体在复杂力学边界条件下通过动力学迭代过程产生位移,迭代过程中位移和力的作用规律就相当于物理方程,即本构方程,而离散元法用块体之间产生一定的位移“叠合”来描述这一关系,它可以是线性的,也可以是非线性的。计算按照时步迭代并遍历整个块体集合,直到每个块体都不再出现不平衡力和不平衡力矩为止^[8]。

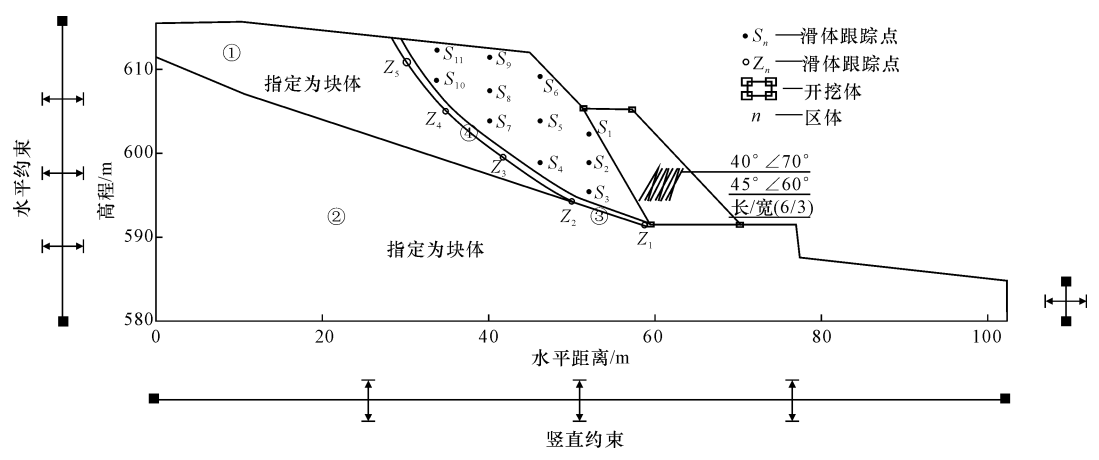


图 3 滑坡概化模型及跟踪点布置
Fig. 3 Numerical model and distribution of monitoring points of landslide

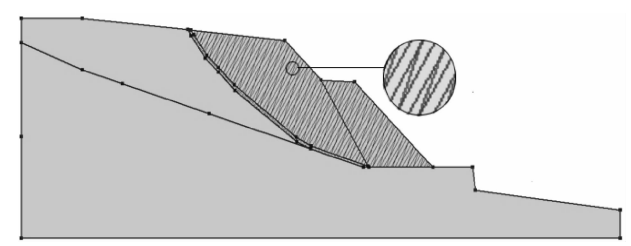


图 4 离散元模型块体分割
Fig. 4 Block segmentation of landslide numerical model

2.2.2 接触模型

模型块体分割后,块体之间接触关系多样,本次计算采用角边接触和边边接触组合的接触模型,其同时包括 2 种基本的接触关系。该模型属于与速度无关的弹塑性无张力接触模型,该模型认为块体之间不存在拉力,且当切向力达到某一最大值时,就会发生塑性剪切滑移。

2.2.3 边界条件

边界条件设置为底部边界竖直方向约束,左右两侧边界水平方向约束,模型上部为自由边界(图

3)。并采用自重应力场,使模型在自重应力下达到平衡。

2.3 参数的确定

根据前期勘查资料及试验数据,结合前人研究成果,综合给出滑坡岩体物理力学参数,见表 1^[9]。结构面力学参数(表 2)中强度指标根据岩体强度指标进行经验折减确定,刚度指标根据软件提供的公式计算得出

$$K_n=\frac{Ea}{2b} \tag{1}$$

$$K_s=\frac{K_n}{2(1+\mu)} \tag{2}$$

接触模型中角边接触关系所需参数由式(1)、式(2)求得即可,而边边接触关系所需参数则需由下式计算得出

$$J_{K_n}=\frac{K_n}{L} \tag{3}$$

表 2 结构面力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of structural planes

类别	结构面	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	均布法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	均布切向刚度/(GPa·m ⁻¹)	内摩擦角/(°)	均布粘聚力/(kPa·m ⁻¹)
天然	岩层面	1.32	1.05	26.5	120	0.33	0.26	24.5	30
	节理面	1.10	0.88	25.5	100	0.28	0.22	23.0	25
饱和	岩层面	0.65	0.52	18.0	80	0.16	0.12	16.5	20
	节理面	0.50	0.40	17.0	60	0.13	0.10	15.5	15

3 数值模拟结果与分析

滑坡形成的主要诱因是边坡开挖,根据这一特点将离散元数值模拟方案设置为 2 个阶段,即开挖前边坡模拟阶段和滑坡模拟阶段。

3.1 开挖前边坡稳定性分析

开挖前边坡数值模拟过程共迭代 20 327 时步,理论历时 15 s,每步迭代用时约 7.37×10⁻⁴ s,计算结果收敛。计算结果显示,仅边坡坡脚处部分块体发生微量剪切位移,约 0.3~5.0 mm,该位移可认为是由内部应力调整引起的,边坡整体未发生显著变形,这与实际情况一致。设置第 2 阶段(滑坡模拟),利用分析域模块中的挖掘工具(静力开挖),将边坡前部块体消除,并开始新阶段的模拟。

3.2 滑坡运动过程模拟

滑坡数值模拟阶段共迭代 5 725 301 时步,整个迭代过程理论历时 154 s,每步迭代用时约 2.69×10⁻⁵ s,迭代过程直观地刻画了边坡开挖后,坡体逐渐变形破坏形成滑坡的全过程,如下页图 5 所示。

$$J_{K_s}=\frac{K_s}{L} \tag{4}$$

$$J_c=\frac{c}{L} \tag{5}$$

式中:K_n 为法向刚度;K_s 为切向刚度;E 为弹性模量;a、b 分别为块体的长和宽;μ 为泊松比;J_{K_n}、J_{K_s}、J_c 分别为边上的均布法向刚度、均布切向刚度和均布粘聚力;L 为 2 个块体的接触边长;c 为粘聚力(各参数单位见表 1、表 2)。

表 1 岩体物理力学参数

Tab. 1 Physico-mechanical parameters of slope rock mass

岩体类别	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
强风化岩体	2 300	9	0.36	130	27.5
弱风化岩体	2 400	16	0.32	280	33.0
饱和岩体	2 600	7	0.34	100	18.5

边坡开挖破坏了坡体的稳定,坡体处于应力调整阶段,受坡脚软弱带影响,滑坡模型在运行 10 s 时,首先在坡脚处出现蠕滑,前缘坡面发生小范围变形,后缘形成拉裂缝,目前大黄公路 1 号滑坡应处于这一变形阶段;在运行 15 s 时,滑坡后部坡面显著下沉,后部岩体出现偏转、倾覆现象,应力不断向锁固段集中,前缘坡面隆起加剧,坡体内部出现拉张架空现象;在运行 20 s 时,滑坡坡面整体下沉,前缘遭受强烈挤压,形成一组“X”型错动节理,内倾结构面角度变缓,架空带范围逐渐缩小,锁固段趋于破坏,滑坡出现整体滑移趋势;20~45 s,滑动面贯通,滑坡沿软弱面整体滑移,结构面显著错动,滑带块体破损严重,后部岩体不断向前推挤,岩体相互挤压、碰撞剧烈,前部部分滑体冲入稻田;45~105 s,滑体逐渐堆积密实,坡面趋于平缓,中、后部滑体运动基本稳定,仅部分前部岩体顺地势继续滑动;105~154 s,滑体运动逐渐停滞,大量滑体堆积于坡脚,将公路堵塞;运行至 154 s,达到稳定,滑坡运动结束。下页图 5(1)为滑坡跟踪点的运动轨迹图。

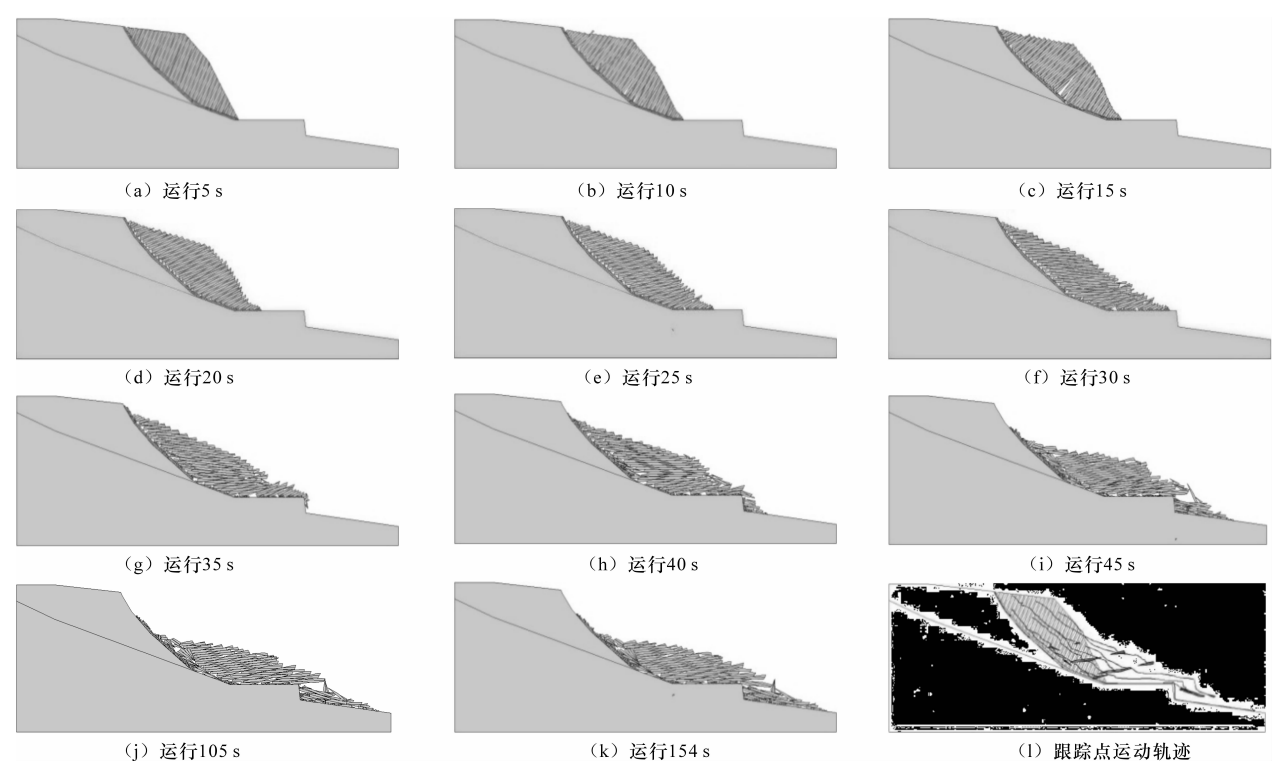


图 5 模型运行不同时间对应单元运动状态

Fig. 5 Unit moving state in different time of landslide numerical model

3.3 跟踪点的运动过程分析

为进一步研究滑坡破坏过程中块体的运动特征,提取滑体上布置的部分跟踪点(块体)的位移时间数据进行分析,如图 6、图 7 所示。从图 6、图 7 中可以看出,滑坡的位移时间曲线具有以下特征:①块体的水平方向位移量普遍大于竖直方向位移量,表明滑坡以水平运动为主,其中水平方向最大位移(Z_1)达到 41.3 m;②竖直方向曲线呈波浪形,而水平方向曲线相对平滑,说明滑坡在运动过程中块体在竖向受到的震动及碰撞更为剧烈;③前部块体 S_1 、 S_3 、 Z_1 水平方向位移量显著大于中、后部块体,且较后部块体进入运动停滞阶段较晚,说明受开挖及坡脚饱水影响,前部块体具有更好的位移空间和加速条件,而后部块体位移则受块体间相互碰撞和前部块体阻挡影响较大,这与陈喜昌等对水力启动型滑坡的研究结果基本吻合^[10];④结合图 5(b)~(d)可以看出,后缘深部块体 S_7 、 S_{10} 、 Z_3 、 Z_5 位移较小且滑动滞后于整体滑动,说明滑面在贯通前内倾结构面与滑动面的组合使得这些块体受到前部块体的支撑和阻碍,待前部完全丧失支撑后才发生滑移。

3.4 速度、加速度变化过程分析

3.4.1 滑坡速度、加速变化过程分析

根据滑坡体平均速度、加速度数据将滑坡的运

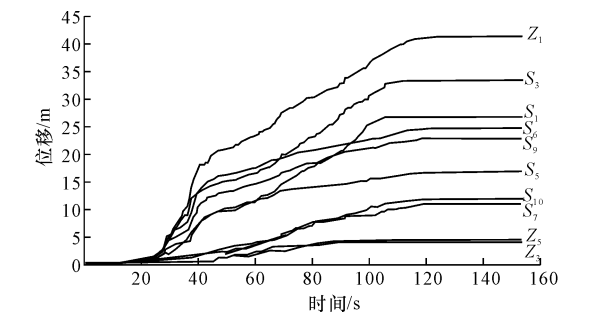


图 6 跟踪点水平位移-时间曲线

Fig. 6 Horizontal displacement-time curve of monitoring points

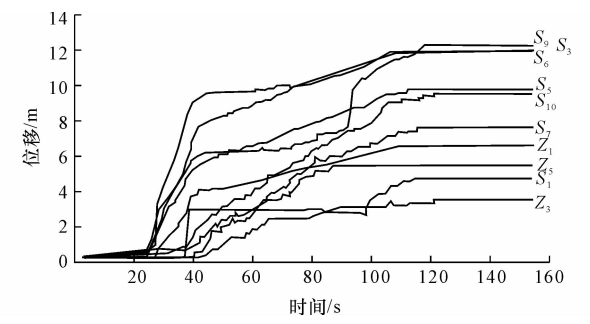


图 7 跟踪点竖向位移-时间曲线

Fig. 7 Vertical displacement-time curve of monitoring points

动过程分为 4 个阶段,即低速蠕滑、高速滑移、减速缓动和自稳调整。滑坡各演化阶段的平均速度、平均加速度数据见下页表 3。

表 3 滑坡各演化阶段平均速度、平均加速度

Tab. 3 Average speed and acceleration of landslide numerical model in evolutionary stages

演化阶段	历时/s	平均速度/(m·s ⁻¹)		平均加速度/(m·s ⁻²)	
		水平	竖直	水平	竖直
低速蠕滑	0~23.5	2.6×10^{-2}	1.1×10^{-2}	2.1×10^{-3}	1.2×10^{-3}
高速滑移	23.5~45.0	3.6×10^{-1}	1.7×10^{-1}	1.7×10^{-2}	4.7×10^{-3}
减速缓动	45~105	1.6×10^{-1}	6.0×10^{-2}	-9.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
自稳调整	105~154	2.4×10^{-2}	9.0×10^{-3}	-2.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}

图 8、图 9 为各滑坡运动阶段内的速度及平均加速度的变化规律。低速蠕滑阶段,滑坡运动速度较低,加速趋势不显著,在运动 10 s 时,水平方向出现速度阶梯,但增量不大;高速滑移阶段,滑坡运动速度显著增加,速度曲线分别在 28.5 s 和 38 s 出现双峰,水平方向峰值为 0.791 m/s² 和 0.8 m/s²,竖直方向峰值为 0.564 m/s² 和 0.651 m/s²。第 1 个峰值速度出现的主要原因是势能的突然释放,由于坡脚锁固段的破坏,前部块体高速滑移,中、后部滑体得到了更好的水平和竖直方向能量释放空间。随着能量的释放及滑动阻力的增大,加速度显著降低,速度减缓,当中、后部滑体的法向压力逐渐施加于原坡脚饱水层时,滑面孔隙水压力逐渐上升,坡体有效应力降低,滑动阻力显著减小,滑坡再次加速(加速度水平和竖直方向分别在 36 s 和 38 s 出现高数值),形成第 2 个峰值速度;减速缓动阶段,速度较前一阶段显著降低,速度较为稳定,滑坡以水平运动为主,竖直方向速度变化多由坡体堆积密实及小块体碰撞引起,该阶段加速度波动也逐渐减缓,负向加速度逐渐增大;自稳调整阶段,滑坡速度和加速度都逐渐减小,最终停滞。

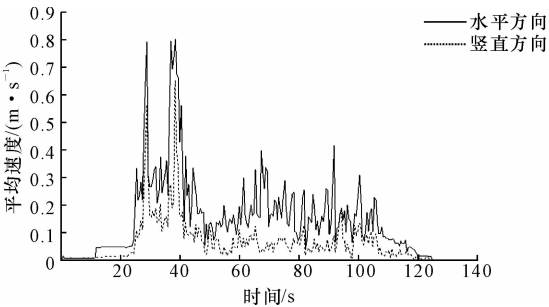


图 8 滑坡平均速度-时间曲线

Fig. 8 Average speed-time curve of landslide numerical model

3.4.2 跟踪点速度、加速度变化过程分析

提取滑坡跟踪点 S₃、S₅、S₈、S₁₀ 的水平速度、加速度时间曲线。从图 10 中可以看出,各跟踪块体由前至后平均速度逐渐降低(分别为 0.22、0.12、0.11、0.08 m/s),出现峰值速度时间也依次变晚,说明滑坡

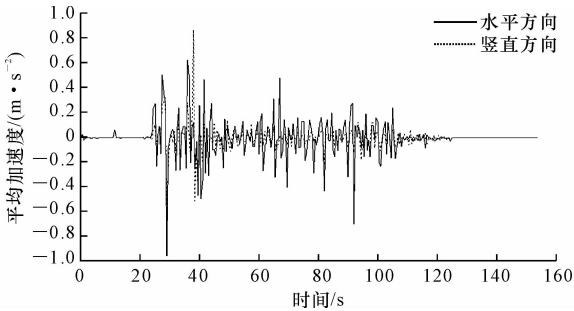


图 9 滑坡平均加速度-时间曲线

Fig. 9 Average acceleration-time curve of landslide numerical

是由前部首先发生滑动破坏,后部受前部牵引而整体滑动的牵引式滑坡。图 11 为滑坡平均加速度时间曲线,由图 11 可知,各块体在运动过程中速度变化的规律,中、后部块体 S₅、S₈、S₁₀ 较前部块体 S₃ 的加速度曲线在高速滑移阶段波动更为剧烈,并出现负向速度,而进入减速缓动阶段后又较 S₃ 平稳,说明高速滑移阶段中、后部块体在运动过程相互碰撞剧烈,并受前部块体阻碍作用显著,在减速缓动阶段,后部滑体所受运动阻力逐渐增大,速度也逐渐降低。

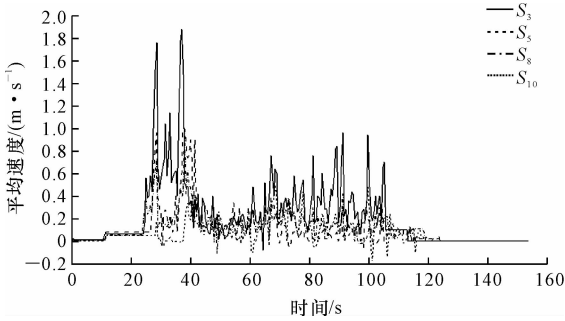


图 10 跟踪点速度-时间曲线

Fig. 10 Speed-time curve of monitoring points

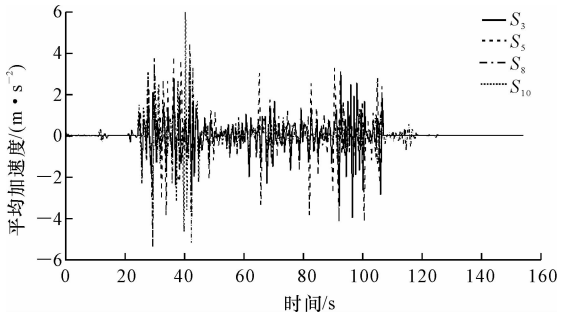


图 11 跟踪点加速度-时间曲线

Fig. 11 Acceleration-time curve of monitoring points

4 结 语

(1) 大黄公路 1 号滑坡目前处于蠕滑滑动阶段,稳定性差。采用折线滑动法计算滑坡稳定系数仅为 1.04,说明目前滑坡处于临界状态,若遇暴雨、地震

等触发因素,滑坡会加速发育以至整体滑动。

(2)开挖前边坡离散元模拟阶段历时 15 s,计算结果收敛,坡体稳定。滑坡阶段离散元模拟历时 154 s,模拟过程直观刻画了边坡在开挖后坡体逐渐失稳出现变形破坏的过程,这个过程中滑坡经历了一段蠕滑期,而大黄公路 1 号滑坡目前正处于这一发育期。滑坡的破坏将对公路上来往车辆及行人造成威胁,前缘部分滑体冲入稻田,最大威胁距离可达 41.3 m。滑坡破坏后主滑体堆积于大黄公路,堆积量约 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,将严重堵塞公路,影响公路的正常运行。

(3)通过对滑坡运动速度、加速度的分析,大黄公路 1 号滑坡将是以水平方向运动为主的牵引式滑坡。边坡开挖是滑坡形成的重要诱发因素,为滑坡的形成提供了良好的滑移空间。坡脚饱水层则为滑坡提供了良好的滑移条件,是滑坡形成的重要影响因素。可按照滑坡运动的平均速度将滑坡分为低速蠕滑、高速滑移、减速缓动和自稳调整 4 个阶段。

参考文献:

References:

[1] 张 斌,刘 高,聂德新,等. 高速公路泥岩边坡时效变形破坏机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(12):1988-1993.

ZHANG Bin,LIU Gao,NIE De-xin,et al. Mechanism of time-dependent deformation and failure of mud-stone slope of express highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(12):1988-1993. (in Chinese)

[2] 兰智雄,王国斌,刘玉山. 有限元模拟在路堑边坡稳定性分析中的应用[J]. 山地学报,2004,22(3):368-372.

LAN Zhi-xiong,WANG Guo-bin,LIU Yu-shan. Application of FEM simulation to slope stability analysis [J]. Journal of Mountain Science,2004,22(3):368-372. (in Chinese)

[3] 漆祖芳,唐忠敏,姜清辉,等. 大岗山水电站坝肩边坡开挖支护有限元模拟[J]. 岩土力学,2008,29(增1):161-165.

QI Zu-fang,TANG Zhong-min,JIANG Qing-hui,et al. Finite element simulation of excavation and support of abutment slope at dagangshan hydropower project[J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(S1):

161-165. (in Chinese)

[4] 冯文娟,琚晓冬. 基于 FLAC^{3D} 的抗滑桩设计方法研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(增2):256-259.

FENG Wen-juan,JU Xiao-dong. Design method for anti-slide piles based on FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(S2):256-259. (in Chinese)

[5] 苏生瑞,张永双,李 松,等. 汶川地震引发高速远程滑坡运动机理数值模拟研究[J]. 地球科学与环境学报,2010,32(3):277-287.

SU Sheng-rui,ZHANG Yong-shuang,LI Song,et al. Numerical analysis on motion mechanism of highspeed and long runout landslide by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2010,32(3):277-287. (in Chinese)

[6] 冯文凯,何 川,石豫川,等. 复杂巨型滑坡形成机制三维离散元模拟分析[J]. 岩土力学,2009,30(4):1122-1126.

FENG Wen-kai,HE Chuan,SHI Yu-chuan,et al. Simulation analysis of formation mechanism of some complex and giant landslides using three-dimensional discrete elements[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(4):1122-1126. (in Chinese)

[7] 郑书彦,李占斌,李甲平,等. 滑坡侵蚀离散元分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2124-2128.

ZHENG Shu-yan,LI Zhan-bin,LI Jia-ping,et al. Study on landslide erosion by discrete element method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(12):2124-2128. (in Chinese)

[8] Cundall P A,Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique,1979,29(1):47-65.

[9] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

Editorial Board of Handbook of Engineering Geology. Handbook of engineering geology[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2007. (in Chinese)

[10] 陈喜昌,谷明成,石胜伟,等. 岩质滑坡的时间预报与水力启动模型[J]. 工程地质学报,2009,17(6):752-761.

CHEN Xi-chang,GU Ming-cheng,SHI Sheng-wei,et al. Model of hydrodynamic start-up for prediction of rock landslide[J]. Journal of Engineering Geology,2009,17(6):752-761. (in Chinese)

