

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.001

# 滑移式危岩体爆破振动动力稳定性研究<sup>\*</sup>

李 程<sup>①</sup> 李洪涛<sup>①②</sup> 姚 强<sup>①②</sup> 李小虎<sup>①</sup>

①四川大学水利水电学院(四川成都,610065)

②四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川成都,610065)

[摘 要] 为了研究爆破振动作用下滑移式危岩体的动力稳定性,以白岩山隧道工程的爆破振动信号为基础,提出滑移式危岩体爆破振动加速度以及受爆破振动作用影响的危岩体稳定性安全系数计算方法。根据现场危岩区调查结果,基于时程分析法并通过 Matlab 计算,得到危岩体爆破振动加速度和危岩体稳定性安全系数时程曲线。结果表明:综合考虑爆破地震波传播过程中的衰减、危岩区频率特性、危岩尺寸以及时间效应等因素的影响,得出的加速度时程曲线和实测的数据基本吻合,计算出的稳定性安全系数符合工程实际,可为类似工程区危岩体稳定安全提供一定的参考。

[关键词] 危岩体;爆破振动;Matlab;时程分析法;动力稳定性

[分类号] TU457;TU93

## Dynamic Stability Analysis of Blasting Vibration of Sliding Dangerous Rock Mass

LI Cheng<sup>①</sup>, LI Hongtao<sup>①②</sup>, YAO Qiang<sup>①②</sup>, LI Xiaohu<sup>①</sup>

① College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University (Sichuan Chengdu, 610065)

② State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University (Sichuan Chengdu, 610065)

[ABSTRACT] In order to study the dynamic stability of sliding dangerous rock mass under blasting vibration, the calculation method of blasting vibration acceleration of sliding dangerous rock mass and the safety factor of dangerous rock mass stability affected by blasting vibration were proposed based on the blasting vibration signal of Baiyanshan Tunnel project. The typical dangerous rock mass model was established according to field investigation. Based on the time history analysis method, the time history curves in term of blasting vibration acceleration and safety factor of dangerous rock mass stability are obtained by Matlab. The results show that the acceleration time history curve obtained by considering the attenuation of blasting seismic wave propagation, frequency characteristics of dangerous rock area, size of dangerous rock and time effect is basically consistent with the measured data, and the calculated stability safety factor aligns with the engineering practice. The study can provide a certain benchmark for the stability and safety of dangerous rock mass in similar engineering areas.

[KEYWORDS] dangerous rock mass; blasting vibration; Matlab; time history analysis; dynamic stability

## 引言

危岩体<sup>[1]</sup>是指悬崖或陡峭边坡上受多组结构面切割,临空条件好,在渗透压力、重力、地震力和地应力以及风化营力等作用下与母岩逐渐分离,从而处于不稳定、欠稳定或极限平衡状态的岩体。危岩体是工程地质研究领域的重点和难点之一。

在我国西部,有 2/3 面积以上的土地为山区,存在山高谷深、交通条件差、地质条件复杂等特点。随着我国高速铁路、公路等的快速发展,人类的生存空间在不断地向山区扩展,涌现出大量采用爆破法施工的工程。其中,爆破产生的爆破振动效应对周边危岩体稳定性的影响主要体现在爆破振动载荷的反复作用上,它会在一定程度上降低危岩体结构面的抗剪强度;此外,爆破振动产生的惯性力会增大危岩体

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-06-17  
基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFC0406800);国家自然科学基金项目资助(51809188)  
第一作者:李程(1993-),男,硕士研究生,主要从事水工结构、工程爆破方面的研究。E-mail:1979733273@qq.com  
通信作者:姚强(1987-),男,博士,讲师,主要从事工程爆破、岩石动力学方面的教学与研究工作。E-mail:yaoqiang777@126.com

的整体下滑力,使得危岩体可能随时发生动力失稳<sup>[2-6]</sup>。

近些年来,由工程爆破引发的危岩崩塌、滑坡等地质灾害事件越来越多。因此,根据爆破振动对邻近边坡的弱化规律来进行危岩体稳定安全的判别,以及对爆破规模、装药量和施工工艺的研究是当前科学研究的重点。

在危岩体稳定性分析中,陈洪凯等<sup>[7-8]</sup>根据危岩体可能发生失稳破坏的形式,将危岩体分为倾倒式、滑移式、错断(坠落)式 3 大类。目前,关于危岩体在爆破振动影响下稳定性的分析方法主要有拟静力法和有限元法;研究对象主要集中在边坡;针对危岩体的分析很少,采用的方法以拟静力法为主。在计算过程中,传统拟静力法很少考虑到爆破地震波在危岩区传播时的衰减、相位以及频率成分,直接采用爆破载荷的峰值加速度进行计算,并考虑一定的爆破动力折减系数,对爆破载荷进行处理,爆破载荷的施加方向为最不利的方向。如 Kesimal 等<sup>[9]</sup>采用拟静力法将爆破地震波产生的动力简化为作用在最不利方向与滑动体稳定方向上的最大水平等效载荷,对爆破振动作用下某石灰岩采石场边坡的动力稳定性进行了研究。而唐洪样等<sup>[10]</sup>通过有限元法建立不同条件下的数值模型,对边坡的整体和局部稳定性给出了一定的判断。研究者们发现<sup>[11-13]</sup>,如果在危岩稳定性分析中把爆破振动载荷简单地等效成拟静力,不能真实地反映爆破振动载荷作用下边坡危岩体的动力响应;而用有限元方法来模拟危岩体的振动响应,仅能从宏观上评估危岩的稳定性。郑颖人等<sup>[14]</sup>对边坡在地震作用下的破坏机制和破裂面的性质以及位置进行分析,提出了基于拉剪破坏动力的时程分析法,为优化爆破分析提供了一定的理论依据。

滑移式危岩体是指其后缘存在与边坡倾斜方向一致的、贯通或断续贯通的中陡倾角结构面,贴于坡面上。自重力以及后期渐进风化的作用促使危岩上裂缝扩张,成为潜在滑面,当滑移面向临空方向的倾角足以使上覆岩体的下滑力大于该结构面的抗滑力时,后缘拉裂面贯通,危岩体将迅速滑落。

本文中,将时程分析法引入到滑移式危岩体爆破振动动力稳定分析中,综合考虑爆破地震波传播过程中的振动衰减、频率特性及相位角变化,提出滑移式危岩体爆破振动加速度和危岩体稳定性的分析方法。最后,结合该方法对白岩山隧道工程典型危岩体进行分析,论证提出的基于时程分析法对滑移式危岩体爆破振动动力稳定性研究的正确性。

## 1 时程分析法简述

### 1.1 爆破振动加速度的确定

爆破振动的载荷施加是通过加速度来定义的。目前,工程爆破主要监测的内容为质点峰值振动速度(PPV);因此,研究爆破振动对滑移式危岩体稳定性的动力响应,就要建立质点 PPV 与加速度之间的数量关系。爆破振动是一个非周期性的瞬态运动过程,由于岩石阻尼产生衰减效应,爆破振动的频率到达危岩区基本以低频成分为主。

同一危岩体不同部位的频率相差较小,因此在计算中假定某一危岩体的爆破振动由某一固定主振频率控制,该主振频率可通过 Matlab 对实测爆破振动波形进行傅里叶分析获得。考虑到爆破振动波的衰减,引入爆破振动时间衰减指数  $\eta$  作近似处理,则水平方向和竖直方向的爆破振动速度波形可以表示为

$$v = Ve^{-\eta t} \sin(2\pi ft + \varphi_0)。(1)$$

式中: $v$  为质点振动速度, m/s;  $V$  为质点峰值振动速度, m/s;  $f$  为爆破振动主振频率, Hz;  $t$  为爆破振动时间, s;  $\varphi_0$  为初相位, m;  $\eta$  为爆破振动随时间的衰减指数。

对式(1)中的时间  $t$  求导,得到爆破振动加速度  $a$  波形的表达式为:

$$a = Ve^{-\eta t} \beta [2\pi f \cos(2\pi ft + \varphi_0) - \eta \sin(2\pi ft + \varphi_0)]。(2)$$

由以上推导可知,爆破振动速度、加速度是随着时间  $t$  而变化的函数,具有时间效应。而爆破时间衰减指数  $\eta$  反映了爆破振动速度随时间的衰减规律,与爆区至测点间的地形、地质等条件有紧密的联系,并且其精确度对爆破振动加速度的计算有着直接影响。

建立爆破加速度计算模型,推导爆破振动加速度以时间和空间两个参数为变量的表示形式。

如图 1 所示,坐标原点  $A$  为爆源,以危岩体中任意单元体的质心点  $B$  为研究对象,将  $B$  点与  $A$  点的水平距离记为  $x$ ,高差记为  $y$ ,则两点之间的距离为  $R = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 。

爆破地震波是由爆源逐渐向危岩体各个方向、位置传播的,爆破地震波产生的爆破振动加速度随着危岩体各点和爆源点的距离  $R$  的变化而变化,考虑其时间效应,则危岩体中任意点  $B$  处的加速度可以表示为

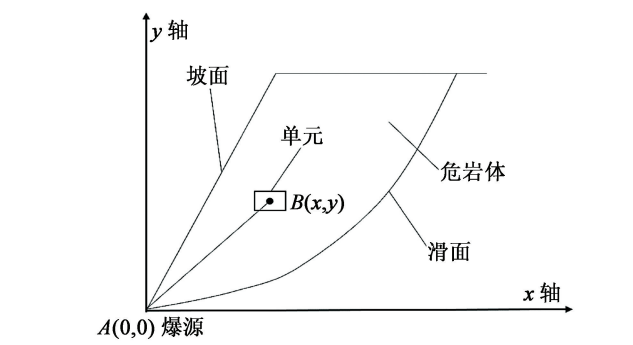


图 1 爆破振动加速度计算模型  
Fig. 1 Calculation model of blasting vibration acceleration

$$a_{(x,y)}(R,t)=\begin{cases} 0, & 0\leq t<\frac{R}{c_p}; \\ Ve^{-\eta(t-\frac{R}{c_p})}\{2\pi f\cos[2\pi f(t-\frac{R}{c_p})+\varphi_0]-\eta\sin[2\pi f(t-\frac{R}{c_p})+\varphi_0]\}, & t\geq\frac{R}{c_p}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_{(x,y)}(R,t)$ 代表 $t$ 时刻危岩体中任意点 $B$ 水平方向及竖直方向爆破振动的合加速度, $\text{m/s}^2$ ;  $R$ 为爆心距, $\text{m}$ ;  $t$ 为爆破振动时间, $\text{s}$ ;  $V$ 为质点峰值振动速度, $\text{m/s}$ ;  $c_p$ 为纵波在危岩体中的传播速度, $\text{m/s}$ ;  $f$ 为爆破振动主振频率, $\text{Hz}$ ;  $\varphi_0$ 为初相位, $\text{m}$ ;  $\eta$ 为爆破振动随时间的衰减指数。

根据式(3),可得到爆破振动加速度时程曲线。假定危岩体 $W$ 的质量为 $m_e$ ,则可得危岩体 $W$ 所受到的爆破振动载荷为:

$$F_x(R,t)=m_e a_x(R,t); \quad (4)$$

$$F_y(R,t)=m_e a_y(R,t)。 \quad (5)$$

式中: $F_x(R,t)$ 为危岩体 $W$ 所受的水平方向爆破振动载荷; $F_y(R,t)$ 为危岩体 $W$ 受到的竖直方向爆破振动载荷。根据式(4)、式(5),已知最大单段起爆药量 $Q$ 、危岩体爆心距 $R$ 以及高程差 $H$ ,则可以计算出危岩体任意时刻、任意位置的爆破振动惯性力。

1.2 基于时程分析法的计算流程

通过 Matlab 编写计算程序,得到了加速度随时间变化的曲线,然后进行爆破振动载荷作用下的滑移式危岩体动力稳定分析。基于时程分析法的 Matlab 计算流程如图 2 所示。

2 算例分析

2.1 危岩区的工程概况

白岩山隧道工程的危岩区位于重庆合川区东北

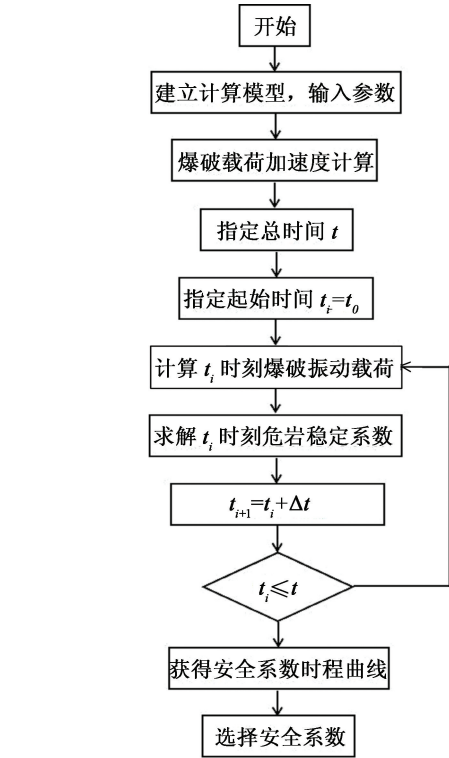


图 2 Matlab 计算流程  
Fig. 2 Matlab calculation flow

部的双凤镇车山村 2 社处的冠顶山陡壁处,此次调查高程范围在 312 ~ 460 m 之间,最大相对高差 148 m,地形主要以低山丘陵和台地为主。根据陡崖坡向、危害对象等将调查区危岩体分为 3 个区。选取危岩 2 区(记为 WY2)中具有代表性的滑移式危岩体 WY2-1 进行不同载荷组合下的稳定性分析,同时对不同载荷组合状态下滑移式危岩体稳定性安全系数进行对比,定量分析不同载荷对稳定性系数的影响程度。图 3 是危岩区地质构造图;图 4 为危岩区地貌特征图。其中,滑移式危岩体 WY2-1 长为 25.7 m,高度为 18.7 m,厚度为 4.0 m,边坡坡度约 80°,坡向 N102°E,直线型坡,母岩为钙泥质胶结砂岩,细到中粒结构,薄到厚层状构造,岩层产状为倾向 335°,倾角 31°,前缘陡峻临空,后缘有拉裂缝,拉裂缝呈弧形,宽约 50 ~ 120 cm,右侧裂缝深度达 10 m,左侧裂缝没有贯通,裂缝总长约 20 m。随着裂缝宽度

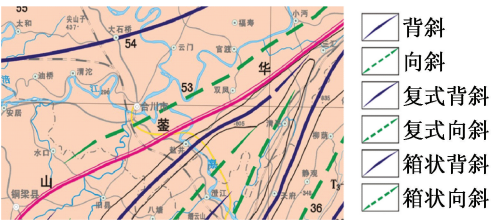


图 3 危岩区地质构造

Fig. 3 Geological structure in dangerous rock area





图 4 危岩区地貌特征

Fig. 4 Geomorphc characteristics in dangerous rock area

的扩大,危岩体将发生滑移式破坏。

2.2 爆破振动下危岩的稳定性分析

通过编写的程序对白岩山隧道工程典型滑移式危岩体 WY2-1 的爆破监测点的加速度进行计算,计算参数如表 1 所示。将时程法计算得到的爆破振动加速度曲线与现场实测信号推求的加速度进行对比。实测信号推求的加速度为现场采用爆破测振仪 TC-4850 记录的数据,现场试验设定的采样频率  $F_s$  为 4 000 Hz,相应的采样间隔时间  $t$  为 25 ms;则计算水平及竖直方向测点的爆破振动速度  $v$  时,时间精确到 25 ms。该仪器推求加速度时程曲线采用式 (6) 进行计算。

$$a(t_i) = \frac{\Delta v(t_i)}{\Delta t_i} = \frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{t_{i+1} - t_i}。$$

(6)

两种加速度时程曲线如图 5 所示。

当  $t \leq 0.3$  s 时,计算出来的加速度与现场实测信号推求的加速度曲线在峰值大小和变化规律两个方面基本相同;但是当  $t > 0.3$  s 时,由现场实测信号推求的爆破加速度时程曲线出现大量高频噪点成分。经分析,主要是因为爆破振动作用存在随时间的衰减效应,从而导致后期  $\Delta v(t_i) = v(t_{i+1}) - v(t_i)$  很小;另外,由于仪器不可避免地存在随机误差,导

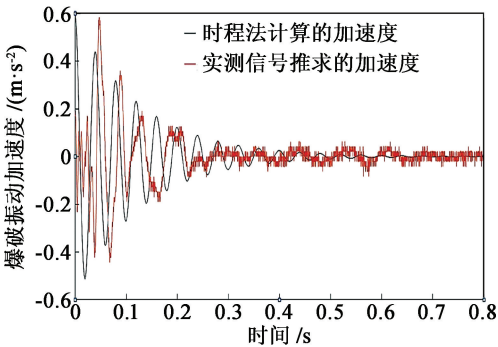


图 5 时程法计算和实测信号推求的爆破振动加速度

Fig. 5 Blasting vibration acceleration obtained from calculation and measured signal on site

致加速度非常敏感。所以,实测信号推求的加速度曲线出现高频振荡问题。相比之下,时程分析法所推求的爆破振动加速度曲线则没有高频噪点成分,曲线的形式更好。

现采用图 2 所示的计算流程,利用 Matlab 中编写的计算程序,对爆破振动影响下的滑移式危岩体 WY2-1 进行动力稳定性计算。危岩体稳定性分析所需的相关参数如表 2 所示,考虑到爆破振动地震波传播过程中的衰减、危岩区频率特性和时间效应等因素,分别计算爆破振动主频在 8、15、25 Hz 3 种工况下的危岩体动力稳定性安全系数时程曲线,计算结果如图 6 所示。

通过对滑移式危岩体 WY2-1 稳定性安全系数时程曲线分析可知,在爆破载荷作用下滑移式危岩体稳定性安全系数在一定范围内随时间的增加呈现降低趋势,且从图 6 中可以确定滑移式危岩体稳定性安全系数达到最小值的时间。爆破振动作用下的滑移式危岩体稳定性安全系数时程曲线在危岩处于天然状态下的稳定性安全系数时程曲线上上下下来回震荡。经分析,主要是因为爆破地震波相位发生变

表 1 WY2-1 加速度计算参数

Tab. 1 WY2-1 acceleration calculation parameters

药量 $Q/\text{kg}$	水平距离 $R/\text{m}$	高程差 $H/\text{m}$	爆破衰减系数			时间衰减指数 $\eta$	振动主频/ $\text{Hz}$
			$K$	$\alpha$	$\beta$		
9	53	1.5	39.06	1.49	-0.002	8	25

表 2 WY2-1 稳定性分析计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of WY2-1 stability analysis

最大单段药量 $Q/\text{kg}$	爆破衰减指数						时间衰减指数 $\eta$		时间步长 $t/\text{s}$
	$K$		$\alpha$		$\beta$				
	水平方向	竖直方向	水平方向	竖直方向	水平方向	竖直方向	水平方向	竖直方向	
480	29.47	29.86	1.34	1.38	-0.004 6	-0.005 6	8.0	4.5	1

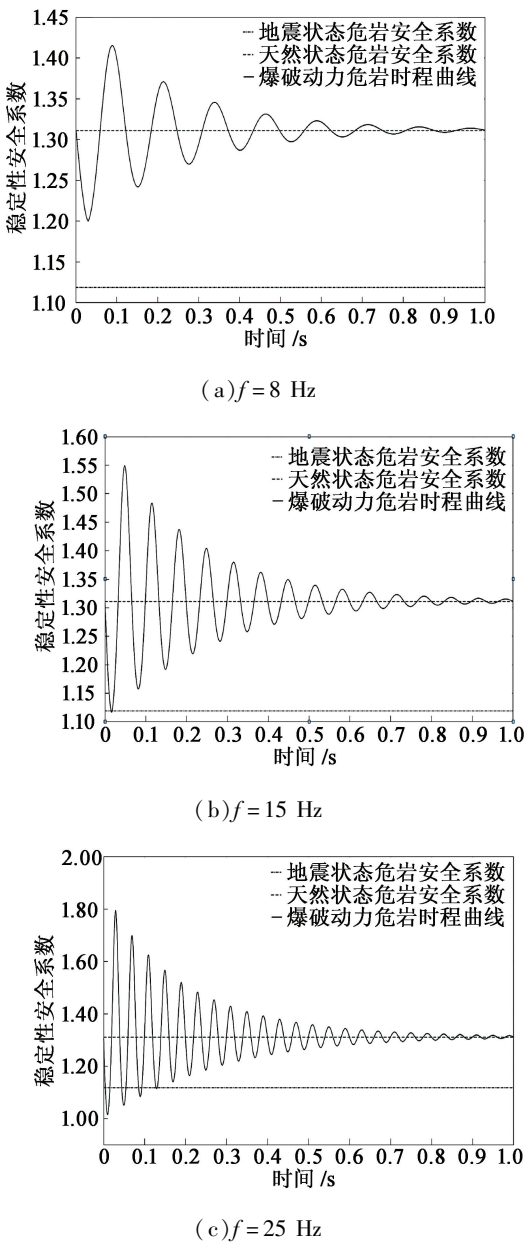


图 6 WY2-1 危岩体稳定性安全系数时程曲线

Fig. 6 Time history curve of stability safety factor for WY2-1 dangerous rock mass

化时,使不同时刻作用在滑移式危岩体上爆破载荷的方向也发生变化。对比 3 种主振频率下的滑移式危岩体稳定性安全系数时程曲线,可以发现,当主振频率从 8 Hz 增大到 25 Hz 时,滑移式危岩体稳定性安全系数时程曲线的振荡频率也逐渐增大,和爆破振动载荷频率的变化趋势相同,相应的稳定性安全系数也逐渐变小。

表 3 为 4 种不同工况下滑移式危岩体的最小稳定性安全系数统计结果,其中降低率的计算公式为

$$m = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100\%。 \tag{7}$$

式中: $m$ 为危岩体稳定性安全系数的降低率,%; $A_1$ 为

表 3 时程法危岩体的最小稳定性安全系数

Tab. 3 The minimum stability safety factor for dangerous rock mass obtained by time history

method		
工况	最小稳定性安全系数 $A$	降低率 $m/\%$
天然状态	1.311	
$f = 8\text{ Hz}$	1.200	8.5
$f = 15\text{ Hz}$	1.117	14.8
$f = 25\text{ Hz}$	1.015	22.6

危岩体处于天然状态下的稳定性安全系数; $A_2$ 为危岩体在爆破振动载荷作用下的稳定性安全系数。

从表 3 中可以看出,天然状态下滑移式危岩体最小稳定性安全系数为 1.311,在考虑危岩区的爆破优势频率后,频率从 8 Hz 增加到 25 Hz 时,滑移式危岩体稳定性最小安全系数从 1.200 降至 1.015,相应的降低率从 8.5% 增至 22.6%。结果表明,随着爆破振动作用的加强,爆破振动对滑移式危岩体的稳定性影响也越来越大;在爆破载荷作用下,危岩体的稳定性安全系数明显降低。爆破地震波频率增大引起的爆破载荷变化相较于相位变化对滑移式危岩体安全系数的影响更加明显,即在爆破峰值振速  $V$  一定的情况下,随着爆破地震波频率的增加,在一定范围内滑移式危岩体稳定性安全系数有不断减小的趋势。

2.3 传统拟静力法的爆破振动下危岩稳定性分析

传统拟静力法发展较早,由于简单实用,迄今仍然被广泛地应用,其基本思想是在已知爆破载荷峰值振动加速度基础上,将爆破动载荷简化为静态惯性力施加在研究对象上,是用静力学方法近似解决动力学问题。

爆破加速度采用式(6)计算。从 2.2 节的分析可以看出,主振频率越大,危岩体稳定性安全系数越低;因此,为了说明问题和简化起见,仅对主振频率为 25 Hz 的情况进行分析。取时程法中 25 Hz 对应的峰值加速度,对滑移式危岩体 WY2-1 的稳定性安全系数进行计算,具体结果如表 4 所示。

表 4 拟静力法危岩体的稳定性系数

Tab. 4 Stability parameters of dangerous rock mass obtained by pseudo static method

水平加 速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )	竖直加 速度/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )	单位长度危 岩体质量 $M$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	安全系数 $A$	降低率 $m/\%$
95.77	80.07	184	0.922 1	30

对表 3 和表 4 的计算结果进行比较,可以看出,时程分析法与传统拟静力法计算的结果偏差较大,通过拟静力法将爆破动载荷简化为爆破惯性力,计算得到的滑移式危岩体稳定性安全系数为 0.922 1,安全系数小于 1,危岩体已经处于失稳状态,与天然状态相比,降低率为 30%。

经分析,主要原因如下:传统拟静力法直接采用爆破载荷的峰值加速度进行爆破载荷的计算,施加方向为对危岩体稳定最不利的方向。对比时程法分析结果,水平、竖直加速度并非同时到达峰值,且水平、竖直方向加速度到达峰值时,其振动方向并非都是最不利于危岩体稳定的方向,从而导致计算得到的滑移式危岩体安全系数小于 1,计算结果与工程实际不相符。而时程分析法综合考虑了爆破地震波的衰减、相位变化以及爆破的优势频率等因素,更符合实际,相应的计算出来的滑移式危岩体稳定性安全系数降低率为 22.6%。

### 3 结 论

1)综合考虑了爆破地震波传播过程中的振动衰减、危岩区频率特性、危岩体尺寸以及时间衰减效应等影响因素,提出了基于时程分析法的爆破振动加速度计算方法和受爆破振动作用影响下的滑移式危岩体稳定分析计算流程。

2)以白岩山隧道工程危岩区中典型的滑移式危岩体 WY2-1 为例,基于时程分析法,运用 Matlab 进行计算,得到的加速度时程曲线和仪器测得的加速度时程曲线基本吻合,没有高频噪点存在,效果更好。

3)建立了滑移式危岩体的爆破振动动力稳定性安全系数计算流程,利用 Matlab 计算 3 种主振频率下的动力稳定性安全系数,并与天然状态下的系数进行比较,得出基于时程分析法计算出的危岩体爆破动力稳定性安全系数要大于传统拟静力法计算的结果,由此表明传统拟静力法对危岩体稳定安全的评价过低。这对类似工程危岩区的防灾减灾具有重要参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 刘卫华,黄润秋. 危岩稳定性定量评价研究[J]. 路基工程, 2014(6): 51-57.  
LIU W H, HUANG R Q. Study on quantitative evaluation of perilous rock stability [J]. Subgrade Engineering, 2014(6): 51-57.
- [2] 柴衡山,张晨洁,刘涛,等. 爆破振动对临近尾矿坝的安全影响分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(5): 59-65.  
CHAI H S, ZHANG C J, LIU T, et al. Safety impact analysis of blasting vibration on approaching tailings dam [J]. Engineering Blasting, 2018, 24 (5): 59-65.
- [3] 费鸿禄,张超逸,洪陈超,等. 全断面与台阶法爆破作用下围岩的振动特征[J]. 爆破器材, 2017, 46(3): 52-56.  
FEI H L, ZHANG C Y, HONG C C, et al. Dynamic response of surrounding rock under full face or bench blasting excavation [J]. Explosive Materials, 2017, 46 (3): 52-56.
- [4] 龙源,娄建武,徐全军. 小波分析在结构物对爆破振动响应的能量分析法中的应用[J]. 爆破器材, 2001, 30(3): 1-5.  
LONG Y, LOU J W, XU Q J. Application of wavelet analysis to the energy method of the structure response caused by explosion vibration [J]. Explosive Materials, 2001, 30 (3): 1-5.
- [5] 张庆新,王潇. 深孔松动爆破技术在特高陡边坡危岩体清除中的应用[J]. 工程爆破, 2013, 19(5): 29-31.  
ZHANG Q X, WANG X. Application of deep-hole loosening blasting technology in the clearance of dangerous rock of the ultra high and steep slope [J]. Engineering Blasting, 2013, 19 (5): 29-31.
- [6] 李冀祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.  
LI J Q, MA S Z. Explosive mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [7] 陈洪凯,唐红梅,王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 614-619.  
CHEN H K, TANG H M, WANG R. Calculation method of stability for unstable rock and application to the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 614-619.
- [8] CHEN H K, TANG H M, YE S Q. Research on damage model of control fissure in perilous rock [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(7): 967-974.
- [9] KESIMAL A, ERICKI B, CIHANGIR F. Environmental impacts of blast-induced acceleration on slope instability at a limestone quarry [J]. Environmental Geology, 2008, 54(2): 381-389.
- [10] 唐洪祥,邵龙潭. 地震动力作用下有限元土石坝边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1318-1324.  
TANG H X, SHAO L T. Finite element analysis of slope stability of earth-rock dam under earthquake [J]. Chi-

用[D]. 南京:南京理工大学, 2012.

YIN G J. Research on the synthesis of a new type emulsifier and its application on industry explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[11] 谢丽,郭晓晶,李斌栋,等. 聚异丁烯丁二酸三乙醇胺酯的合成及应用研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(2): 1-4.

XIE L, GUO X J, LI B D, et al. Synthesis and application of the polyisobutylene succinic esters based on triethanolamine[J]. Explosive Materials, 2012, 41(2): 1-4.

[12] 张咪咪,卫延安. 糠蜡型复合油相专用乳化剂的研制和应用[J]. 爆破器材, 2015, 44(3):39-42.

ZHANG M M, WEI Y A. Preparation and application of special emulsifier for composite oil phase containing bran wax[J]. Explosive Materials, 2015, 44(3):39-42.

[13] 张凯铭. 乳化炸药基质的流变性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.

ZHANG K M. Study of the rheology of emulsion explosive matrix[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

[14] ZHANG K M, NI O Q. Rheological properties and stability of highly concentrated water-in-oil emulsions with different emulsifiers[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2014, 36(4):549-555.

[15] FOUDAZI R, MASALOVA I, MALKIN A Y. The role of interdroplet interaction in the physics of highly concentrated emulsions [J]. Colloid Journal, 2010, 72(1): 74-92.

[16] MASALOVA I, KHARATYAN E. Effect of silica particles on stability of highly concentrated water-in-oil emulsions with non-ionic surfactant [J]. Colloid Journal, 2013, 75(1): 95-102.

[17] MASALOVA I, KHARATYAN E, TSHILUMBU N N. Effect of the type of the oil phase on stability of highly concentrated water-in-oil emulsions [J]. Colloid Journal, 2013, 75(5): 579-585.



(上接第 6 页)

nese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1318-1324.

[11] 李维光,张继春. 爆破振动作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 426-430.

LI W G, ZHANG J C. Study on rock mass bedding slope stability under blast seism [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 426-430.

[12] 陈明,卢文波,周创兵,等. 基于等效加速度的岩质边坡爆破动力稳定性[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 475-480.

CHEN M, LU W B, ZHOU C B, et al. Rock slop stability under blasting vibration based on equivalent acceleration[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(5): 475-480.

[13] 李洪涛,卢文波,舒大强. 小波分析在爆破振动加速度推求中的应用[J]. 爆破器材, 2006, 35(5): 4-7.

LI H T, LU W B, SHU D Q. Application of wavelet analysis in calculating blasting vibration acceleration [J]. Explosive Materials, 2006, 35(5): 4-7.

[14] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程震动, 2010, 30(2): 173-180.

ZHENG Y R, YE H L, HUANG R Q, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173-180.