

# ANSYS 在岩质边坡动力响应分析中的应用

张学东<sup>1</sup>, 言志信<sup>1,2</sup>, 张 森<sup>1</sup>

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**在动力有限元理论的基础上运用 ANSYS 软件对不同高度和坡度的岩质边坡进行了模态分析和地震加速度时程分析,发现了一些新的动力响应规律和现象。模态分析显示:随坡高的增加边坡的自振频率呈降低的趋势;而坡度变化对其影响则具有相反的规律。通过地震加速度时程分析发现:边坡的位移、速度、加速度反应三量具有相似的响应规律;随坡高的增加坡顶位移时程曲线振幅增大,但达到一定高度时(约 200 m)则变化较小,同时坡顶处的地震动响应相对于坡脚处出现了明显的滞后现象;坡度增加时坡顶位移呈线性增加的趋势;地震波的衰减效应与边坡对其的放大效应是同时存在的。研究结果对边坡的抗震设计具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 岩质边坡; 动力响应; 地震; 时程分析; 数值模拟

**中图分类号:** TU457      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2010)02-0117-05

## Numerical Analysis on Dynamic Response of Rock Slope Using ANSYS Software

ZHANG Xue-dong<sup>1</sup>, YAN Zhi-xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Sen<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western Chinas Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** On the basis of dynamics finite elements theory, rocky slopes with different height and gradient are computed in the process of modal analysis and time-dependent analysis of seismic acceleration by ANSYS software. Some new dynamic response laws and phenomena are found through the research. The modal analysis shows that the natural vibration frequency of slope dropped as rising of slope height; while the changes of slope angle acts contrary to the natural vibration frequency. Time-dependent analysis of seismic acceleration also indicates that the displacement, speed and acceleration of slope response in the similar way. The amplitude of time-dependent curve of slope crest displacement evidently increase as the increasing of the slope height, nevertheless, the slope crest displacement changes slightly when the slope height reaches a certain degree (about 200 m), meanwhile, the ground motion responded at the slope crest has a obvious hysteresis comparing to the slope foot. Furthermore, the slope crest displacement has a linear upward trend with the increasing in slope gradient, besides, the attenuation effect of seismic wave and the amplification effect of slope exists at the same time. The results would have a great reference value to aseismic design of slope.

**Key words:** Rocky slope; Dynamic response; Earthquake; Time-dependent analysis; Numerical simulation

## 0 引言

随着我国西部大开发战略的实施,一批重大工程相继开工建设,工程建设中产生了大量的高边坡<sup>[1]</sup>:如三峡船闸高边坡(170 m)、澜沧江小湾水电站泄水建筑物边坡(239 m)、溪洛渡水电站拱肩槽边坡(250 m)等。而我国西部又是地震多发区,工程高边坡都面临着地震的严峻考验。特别是2008年汶川特大地震导致了大量的滑坡,给人民的生命和财产造成了重大损失。因此对于岩质边坡动力响应的研究具有重大意义。

早在1987年王存玉等人<sup>[2]</sup>在二滩拱坝动力模型实验中就已发现,岩石边坡对地震加速度不仅存在竖直向的放大作用,而且还存在水平向的放大作用。之后国内学者对此方面的研究逐渐增多。梁庆国等<sup>[3]</sup>探讨了垂直向地震作用对节理岩体失稳破坏的影响,进一步阐述了岩体在地震作用下的破坏机制;郭俊英等<sup>[4]</sup>分析了地震动特性对某一特定黄土斜坡稳定性的影响;祁生文等<sup>[5]</sup>利用拉格朗日元法对边坡的动力反应三量进行了研究,发现了“动力高边坡效应”和“动力低边坡效应”;徐光兴等<sup>[6]</sup>研究了地震动参数对边坡地震动响应规律的影响;秋仁东等<sup>[7-8]</sup>用有限元软件分析了高边坡在水平荷载作用下的动力响应规律,并将该方法引进到预应力锚索加固石窟岩体的模拟计算中;梁力等<sup>[9]</sup>借助ANSYS程序对一露天矿岩质高边坡进行了地震动力响应及稳定性的分析;任自铭等<sup>[10]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>软件研究了坡面形态对地震作用下土质边坡稳定性的影响。以上研究工作大多基于数值模拟方法。数值模拟方法是解决工程实际力学问题的有效手段,已被学术界和工程界广泛认可作为一种力学状态的分析工具,在岩石力学与工程中的应用和推广具有广阔前景<sup>[11]</sup>。在地震荷载作用下,目前尚难对实体工程进行现场观测,数值模拟在边坡动力响应研究中的优势日益凸显。为此本文在前人工作的基础上,利用大型通用有限元分析软件ANSYS对岩质边坡动力响应问题进行深入研究。

## 1 有限元动力分析基本原理

动力有限元法同静力有限元问题一样,要把物体离散为有限个数的单元体。但在考虑单元体受到的地震荷载作用时,除考虑动应力特征采用的运动平衡方程,还要考虑单元的惯性力和阻尼力等因素的影响。在动力有限元计算中动应力特征采用下列

运动平衡方程来描述:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中, $M$ 为系统的总质量矩阵; $C$ 为系统的总阻尼矩阵; $K$ 为系统的总刚度矩阵; $\ddot{u}$ 为系统的加速度向量; $\dot{u}$ 为系统的速度向量; $u$ 为系统的位移向量; $F(t)$ 为系统的载荷向量。

动力有限元法中阻尼的确定是计算的关键,工程中常采用质量矩阵和刚度矩阵线性组合的方法,即Rayleigh阻尼(也称比例阻尼): $C = \alpha M + \beta K$ ,其中 $\alpha$ 为质量阻尼系数, $\beta$ 为刚度阻尼系数。根据振型分解法, $\alpha$ 和 $\beta$ 可由下式确定:

$$\alpha = \frac{2(\xi_i/\omega_i - \xi_j/\omega_j)}{(1/\omega_i^2 - 1/\omega_j^2)} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_j\omega_j - \xi_i\omega_i)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)} \quad (3)$$

式中 $\xi_i$ 和 $\xi_j$ 分别为系统第 $i$ 、第 $j$ 阶振型的阻尼比; $\omega_i$ 和 $\omega_j$ 分别为第 $i$ 、第 $j$ 阶振型的自振圆频率,工程中可以取前两阶振型进行计算。

## 2 岩质边坡动力分析模型

### 2.1 地质模型

影响边坡动力反应特性的因素十分复杂,主要包括两个方面:地震动特性和边坡自身的性质。而地震动特性一般包括地震动强度、频谱特性和持时等三个方面<sup>[12]</sup>;边坡自身性质则考虑到边坡的地质背景、岩体的结构类型、岩性组合、边坡高度和坡度及坡型、水文地质条件等因素的影响<sup>[13]</sup>。在数值模拟中如果综合考虑上述各种因素的影响,将使问题变得十分复杂,甚至无法求解。本文着重研究坡高和坡度对边坡动力响应的影响,因此将岩石边坡概化为均质、连续的弹塑性模型(图1),岩体的物理力学参数采用文献[9]中的参数,如表1所示。

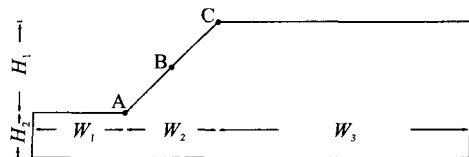


图1 岩质边坡概化模型

Fig. 1 Resumptive model of rocky slope.

表1 边坡岩体物理力学参数

材料	密度/ [kg·m <sup>-3</sup> ]	弹性模量 /MPa	泊松比	粘聚力 /kPa	摩擦角/°
④	2 390	135.24	0.290	115	33.07

数值模拟中,使用Plane42单元对边坡剖面进行离散,并将其考虑为平面应变问题。本构模型采

用弹塑性模型,破坏准则选择适合于岩土介质的 D-P 准则。

2.2 地震波的选择

本文采用时程分析法模拟边坡在地震作用下的动力响应问题。地震波选择 1995 年日本的 kobe 地震水平向加速度时程曲线,如图 2 所示。该地震震级为 7.2,研究中截取其中具有代表性的一段地震波,持续时间为 20 s,峰值加速度为  $0.83 \text{ m/s}^2$ ,时间步长为 0.02 s。

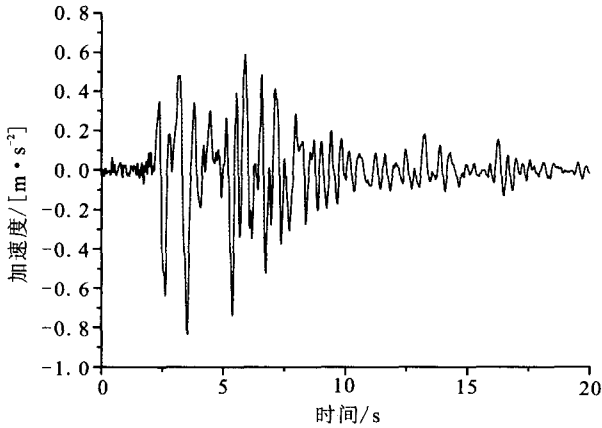


图 2 kobe 波水平加速度时程曲线

Fig. 2 The time-dependent curve of horizontal acceleration of kobe wave.

2.3 数值模拟工况

为确定坡高和坡度变化对边坡动力响应的影响,本文分别对不同高度和坡度的边坡进行了模拟。在坡度不变的情况下( $45^\circ$ ),坡高变化从 50 m、100 m、200 m 到 300 m;在坡高不变的情况下(300 m),坡度变化从  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 到  $90^\circ$ 。具体工况见表 2。

表 2 不同工况边坡的几何特征

		$W_1/m$	$W_2/m$	$W_3/m$	$H_1/m$	$H_2/m$
坡高变化	工况 1	50	50	100	50	25
	工况 2	100	100	200	100	50
	工况 3	200	200	400	200	100
	工况 4	300	300	600	300	150
坡度变化	工况 5	300	519.6	800	300	150
	工况 6	300	300	600	300	150
	工况 7	300	173.2	600	300	150
	工况 8	300	0	600	300	150

3 模态分析

模态分析是 ANSYS 软件中的一个动力求解模块,用于确定结构的固有频率和振型,这是结构承受动态载荷结构设计中的重要参数。模态分析也是后续的时程分析的基础。在边坡的有限元模型建立之后,进入模态分析(modal)模块,用分块 Lanczos 法进行模态分析,提取系统的前十阶振型和频率(表 3)。

表 3 不同工况下边坡的前十阶自振频率(Hz)

阶数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
1	0.775 54	0.387 76	0.193 87	0.129 23	0.114 53	0.129 23	0.13 004	0.124 76
2	0.900 58	0.450 27	0.225 14	0.150 09	0.149 9	0.150 09	0.149 82	0.149 25
3	0.998 49	0.499 21	0.249 56	0.166 33	0.155 6	0.166 33	0.167 13	0.161 95
4	1.260 1	0.629 96	0.314 68	0.209 59	0.182 82	0.209 59	0.213 51	0.216 25
5	1.487 5	0.743 65	0.371 54	0.247 49	0.200 65	0.247 49	0.263 38	0.285 26
6	1.664 2	0.832 04	0.415 51	0.276 68	0.223 02	0.276 68	0.287 51	0.307 68
7	1.823 4	0.911 62	0.454 92	0.302 75	0.252 94	0.302 75	0.317 95	0.331 21
8	1.955 8	0.977 62	0.488 61	0.325 47	0.276 9	0.325 47	0.344 28	0.365 57
9	2.136 6	1.068 1	0.533 02	0.354 65	0.288 16	0.354 65	0.379 89	0.394 92
10	2.193 1	1.096 2	0.547 3	0.364 21	0.301 66	0.364 21	0.384 79	0.410 54

根据坡高和坡度的变化,分别将不同工况下边坡的前十阶自振频率绘制在图 3 中,通过模态分析结果可以得到以下规律:

(1) 从图 3(a)中可以看出:随坡高的增加边坡的自振频率减小,自振周期延长。当坡高小于 200 m 时其自振频率降低的幅度较大;当坡高大于 200 m 时降低的趋势减缓。由此看来坡高对岩质边坡振动效应的影响较大。由于边坡的自振频率随高度的增加而减小,从而可以推断出高频地震波对低边坡影响较大,低频地震波对高边坡影响较大。此结论

还有待于后续研究的证实。

(2) 从图 3(b)中可以看出:边坡的自振频率随坡度的增加而增大,前两阶频率虽然变化不是很明显,但从总体来看则具有很强的规律性。通过与图 3(a)进行对比可以发现,坡度变化对边坡自振频率的影响规律与坡高变化对边坡自振频率的影响规律相反。

根据上述规律,可以在边坡的抗震设计中考虑地震波频率与边坡自振频率的关系,采取适宜的治理措施,从而降低边坡的震害效应。另外通过模态

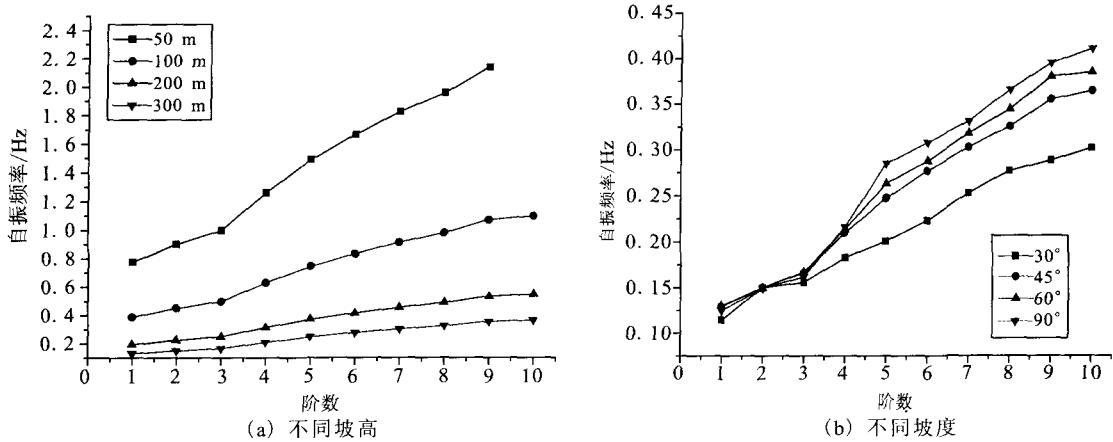


图3 不同坡高和坡度下边坡的前十阶自振频率

Fig. 3 The first 10 periods natural vibration frequencies of rocky slope with different height and different slope gradient.

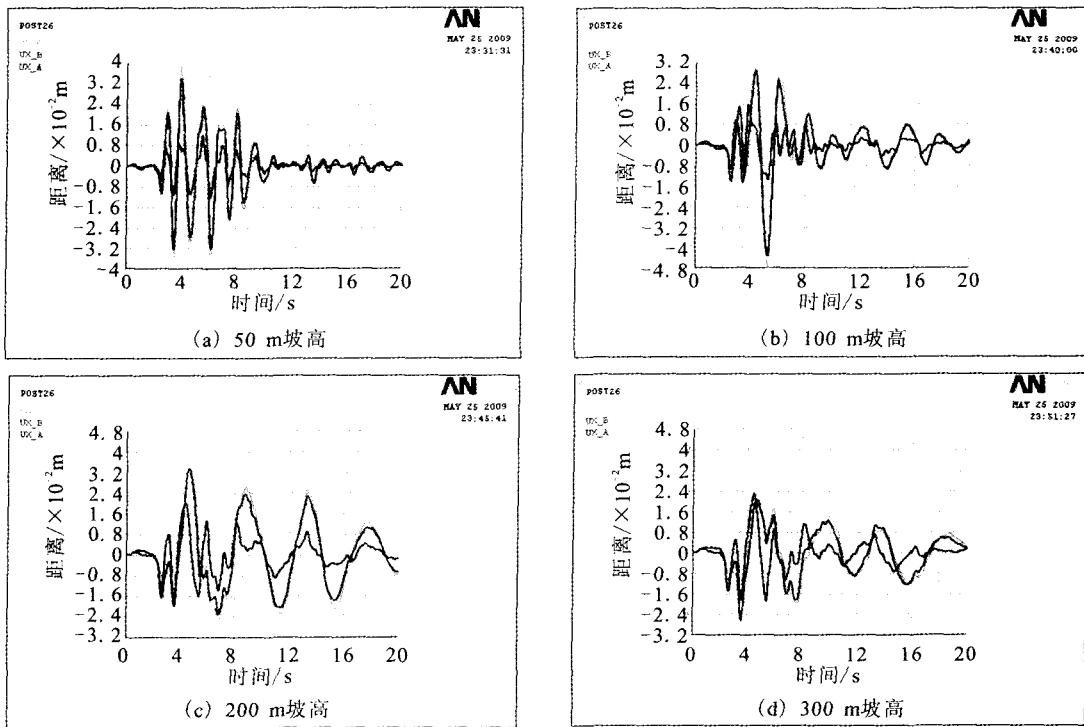


图4 不同坡高时坡顶、坡腰和坡脚的水平位移曲线

Fig. 4 The time-dependent curves of horizontal displacement at top, half way and foot of slop with different height.

解中的前两阶频率,结合公式(2)、(3)可以计算出阻尼系数  $\alpha$  和  $\beta$ ,进而可以计算不同工况下边坡的 Rayleigh 阻尼,也是后续时程分析的基础。

### 4 动力响应时程分析

ANSYS 软件中所提供的瞬态动力学分析 (Transient) 模块,能够很好的模拟地震作用。在边坡的有限元模型建立之后,在模型底部输入地震加速度时程曲线(图2),通过 Transient 模块求解可以得到各节点在连续时间内的应力解、位移解、速度解

及加速度解。数值模拟的结果显示边坡的位移、速度、加速度反应三量具有相似的响应规律,鉴于篇幅所限本文仅对位移响应进行研究。

#### 4.1 不同坡高下的数值模拟结果

在边坡的坡面上设置 A、B、C 三个监测点,如图1所示。图4分别为 50 m、100 m、200 m、300 m 坡高所对应的坡脚、坡腰和坡顶三点的水平位移时程曲线。其中蓝色、紫色、红色曲线分别为坡顶(C点)、坡腰(B点)和坡脚(A点)的水平位移时程曲线。

通过对数值模拟结果的分析可以发现,不同坡高下岩质边坡的地震动响应有以下特点:

(1) 边坡对地震波的放大效应是普遍存在的。图4中坡顶位移时程曲线相对于坡脚位移时程曲线的振幅都有明显的放大现象。随着坡高的增加坡顶的水平位移时程曲线振幅增大,但达到一定高度(约200 m)时坡顶位移则变化较小。

(2) 边坡高度小于200 m时,A、B、C三点的水平位移时程曲线相位基本一致,说明坡面处各点的响应几乎是同步的;当坡高达到300 m时,坡顶(C点)处的曲线相对于坡脚(A点)处出现了明显的滞后现象,这是由于地震波是从模型的底部输入自底向上传播的,当坡高较低时由于地震波传播速度较快,表现为边坡各点的响应基本没有时间差异;当坡高达到一定高度时地震波传播的时间效应已不能忽略,表现为坡顶相对于坡脚响应的滞后性。

(3) 从时程分析的结果来看,不同高度边坡的水平位移最大响应都发生在坡顶处。在坡高分别为50 m、100 m、200 m和300 m时,坡顶最大水平位移分别为4 cm、4.8 cm、3.2 cm和2.4 cm。由此可见地震波在传播过程中既存在放大的效应又存在着衰减效应,当坡高小于临界高度时(约为100 m),放大效应起主要作用;当坡高大于临界高度时,衰减效应开始占主导地位。

#### 4.2 不同坡度下的数值模拟结果

提取不同坡度下边坡坡顶的水平位移,可以得到图5中的趋势曲线。可以看出,随坡度的增加坡顶水平位移呈线性增加的趋势。这就要求我们在工程设计中,尽量避免陡立边坡的形成,以降低地震荷载对边坡的影响程度。

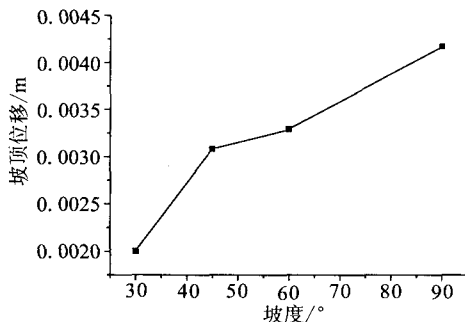


图5 不同坡高下坡顶位移

Fig. 5 Displacement on slope crest with different slope gradients.

## 5 结论

本文采用 ANSYS 软件对不同高度和坡度的岩

质边坡进行了模态分析和地震动响应的时程分析,得出以下结论:

(1) 边坡的自振频率随坡高的增加而减小,而受坡度的影响则相反。由此可以推断,高频地震波对低边坡影响较大,低频地震波对高边坡的影响较大。此论断有待于后续研究的证实。

(2) 边坡的位移、速度、加速度反应三量具有相似的响应规律;坡度对边坡的动力响应表现为随坡度的增大,坡顶处的水平位移呈线性增加的趋势;由于地震波传播的时间效应,导致了边坡达到一定高度时(约300 m),坡顶相对于坡脚的地震动响应出现了滞后现象;地震波在传播过程中的衰减效应与边坡对其的放大效应是同时存在的,致使边坡出现了一临界高度(约100 m)成为两种效应的转折点,当坡高小于临界高度时放大效应起主要作用,当坡高大于临界高度时衰减效应开始起主要作用。

#### [参考文献]

- [1] 李天斌,王兰生.岩质工程高边坡稳定性及其控制[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 王存玉,王思敬.地震条件下二滩水库岸坡稳定性研究[A]//岩体工程地质力学问题(七)[G].北京:科学出版社,1987:5-74.
- [3] 梁庆国,韩文峰,赵士耀.垂直向地震作用对节理岩体失稳破坏的影响[J].西北地震学报,2007,29(4):307-313.
- [4] 郭俊英,石玉成.地震动特性对黄土斜坡稳定性的影响分析[J].西北地震学报,2004,26(3):250-254.
- [5] 祁生文,伍法权,严福章,等.岩质边坡动力反应分析[M].北京:科学出版社,2007.
- [6] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等.边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):918-923.
- [7] 秋仁东,石玉成,付长华.高边坡在水平动荷载作用下的动力响应规律研究[J].世界地震工程,2007,23(2):131-138.
- [8] 秋仁东,石玉成,徐舜华,等.预应力锚索加固石窟岩体的地震动力响应研究[J].西北地震学报,2007,29(1):49-53.
- [9] 梁力,王伟,李明.某露天矿岩质高边坡地震动力响应及稳定性分析[J].金属矿山,2008,(8):20-25.
- [10] 任自铭,姚令侃.坡面形态对地震作用下土质边坡稳定性影响[J].路基工程,2008,(5):5-7.
- [11] 洪海春,徐卫亚.地震作用下岩质边坡稳定性分析综述[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):4827-4836.
- [12] 陈国兴,庄海洋,杜修力,等.土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验--试验结果分析[J].地震工程与工程振动,2007,27(1):164-170.
- [13] 祁生文,伍法权,刘春玲,等.地震边坡稳定性的工程地质分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2792-2797.