

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0365-07

含软弱层岩质边坡的动力响应研究

李 鹏, 苏生瑞, 王闫超, 王 琦

(长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘要: 含软弱层岩质边坡的动力响应研究已成为边坡工程稳定性分析中的一个重要问题。为研究软弱层的特性对岩质边坡动力响应的影响, 提供动力荷载作用下边坡防灾减灾的指导依据, 运用 UDEC 离散元软件模拟地震力作用下含软弱层岩质边坡的动力响应系统地分析软弱层的倾角、埋深、弹性模量、厚度、泊松比和剪切刚度等因素对地震波放大现象的影响, 得出边坡坡顶放大系数的变化规律, 即随着软弱层倾角的增大, 放大系数呈现出增大→减小→再增大→再减小, 并出现地震响应减弱的现象; 放大系数随软弱层埋深和厚度的增加而增大, 但随弹性模量、剪切刚度的增大而减小, 随泊松比的增加几乎不变。结合非重复性试验二元方差分析评价理论, 对所得的放大系数进行计算分析, 得出软弱层的特性因素对边坡放大作用的影响强度为软弱层的倾角>埋深>弹性模量>剪切刚度>厚度>泊松比。研究结果有助于进一步揭示地震作用下边坡的失稳机制, 对震区边坡灾害的防治有一定的指导意义。

关键字: 离散元软件; 岩质边坡; 动力响应; 软弱层; 放大系数

中图分类号: TU472

文献标识码: A

Research on dynamic response of rock slope with weak layer

LI Peng, SU Sheng-rui, WANG Yan-chao, WANG Qi

(College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Researching on the dynamic response of the rock slopes with weak layer has become an important issue in slope stability analysis. In order to discuss the influences of dynamic response of rock slope by weak layer's characteristics and provide the directions and guidance for slope disaster prevention and mitigation under the dynamic load, the distinct element models are built and dynamic response of rock slopes with weak layer under seismic force are simulated by the universal distinct element code(UDEC). After simulating in different conditions: various dip angles, burial depths, elastic moduli, thicknesses, Poisson's ratios and shear stiffness factors of the weak layer, the amplitude values of slope crest and bottom are obtained and the amplification coefficients are calculated; through systematically analyze the amplification coefficients, the amplification law of slope crest which influenced by seismic wave is got, namely, with increasing of dip angle, the amplification coefficient demonstrates increase→decrease→reincrease→decrease law, and appears response weakening phenomenon at the decreased parts. Along with burial depth and thickness increasing of weak layer, the amplification become bigger, but it decreases with elastic modulus and the shear stiffness increasing; the amplification almost doesn't change with increasing of Poisson's ratio. Combining with the non-repetitive test binary analysis of variance evaluation theory, the obtained slope amplification coefficients are analyzed; and then, it is obtained that the significant factors which contribute to the slope dynamic response from great to small are the dip angle, burial depth, elastic modulus, shear stiffness, thickness, Poisson's ratio of the weak layer. The results are helpful to further researches on the slope instability mechanism under earthquake, and can provide the significant guidance to slope disaster prevention in earthquake region.

Key words: universal distinct element code; rock slope; dynamic response; weak layer; amplification coefficient

1 引言

我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间, 是一个地震多发、灾情严重的国家, 地震不仅直接

造成人员伤亡和建筑物的破坏, 而且诱发了大量次生灾害, 仅 2008 年 5 月 12 日的汶川大地震就造成数以万计的崩塌、滑坡灾害, 数量之多、破坏之大举世罕见^[1]。水利工程、山区公路修建及露天矿开

收稿日期: 2012-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.41030749, No.41072223); 西部交通建设科技项目资助(No.2009318000095)。

第一作者简介: 李鹏, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事地质灾害与岩土工程方面的研究。E-mail: lipeng198782@163.com

采中由爆破动荷载诱发的边坡失稳也是常见的地质灾害之一^[2]。

软弱层是动荷载条件下岩体工程中的薄弱部位,因其弹性模量小、强度低,往往对工程产生不良的影响。近年来,含软弱层岩质边坡的动力问题已引起了岩土工程界的广泛关注^[3-4]。杜晓丽等^[5]借助有限元模拟软件,探讨了结构面倾角与边坡稳定性的关系。柴红保等^[6]研究了竖直向上传播剪切波作用下的边坡放大规律。黄润秋等^[7]模拟了隐伏软弱夹层的弹塑性参数对其地震波放大效应的影响,得出了夹层放大作用主要与其波速有关,与密度关系不大。范留明等^[8-9]给出了薄弹性软弱夹层的动力响应模型,建立了弹性夹层对平面矢量波的透射模型。然而,很少有人系统地研究软弱层的特性对岩质边坡动力响应的影响。

本文借助 UDEC 离散元程序模拟了不同倾角、埋深、弹性模量、剪切刚度、泊松比和厚度情况下含软弱层岩质边坡的动力响应,得出了边坡坡顶的放大系数,并采用非重复性试验二元方差分析评价理论对所得的放大系数进行分析,得出了软弱层的特性因素对边坡放大作用的影响强度大小。

2 计算模型的建立

2.1 离散元模型的确立

为了模拟软弱层的特性对岩质边坡动力响应的影响,将其设置为水平层状,离散元模型见图 1(a),模型中边坡顶宽 200 m,底宽 400 m,高 200 m,单台阶高 100 m,坡角为 50°。图中,①为花岗岩;②为页岩(软弱层);③为灰岩;①、②之间的有软弱结构面 I,②、③之间软弱结构面 II。为了探讨层状软弱层倾角对边坡动力响应的影响,建立如图 1(b)所示离散元模型,模型中软弱层倾角 α 为 15°~135°。完整岩石材料和结构面的力学参数分别见表 1、2。表中, K 为体积模量 (GPa); G 为剪切模量 (GPa); ρ 为岩体密度 (kg/m^3); E 为弹性模量 (GPa); ν 为泊松比; φ 为内摩擦角 ($^\circ$); c 为黏聚力 (MPa)。

2.2 模型网格划分

根据 Kuhlemeyer 等^[10]的研究成果,模型网格尺寸受输入最短波长的控制。设网格最大尺寸为 Δl , 输入波最短波长为 λ , 则 Δl 必须小于最短波长 λ 的 1/10~1/8。此外,所选定的网格单元的尺寸对输入波的频率也有要求,在 UDEC 中,一定网格尺寸所允许的在该系统中传播而不使波形失真的输入波的最高频率 $f_{\max}$ ^[2]为

$$f_{\max} = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{10\Delta l} \quad (1)$$

式中: λ 为最短波长,即最高频率所对应的波长 (m); Δl 为沿着波传播方向上的差分三角形网格单元的最大长度 (m); C 取纵波 C_p 波速和横波 C_s 波速中小者,没有现场实测波速值时, C_p 和 C_s 确定为

$$C_p = \sqrt{\frac{k + 4G/3}{\rho}}; C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (2)$$

式中: C_p 为纵波波速 (m/s); C_s 为横波波速 (m/s)。

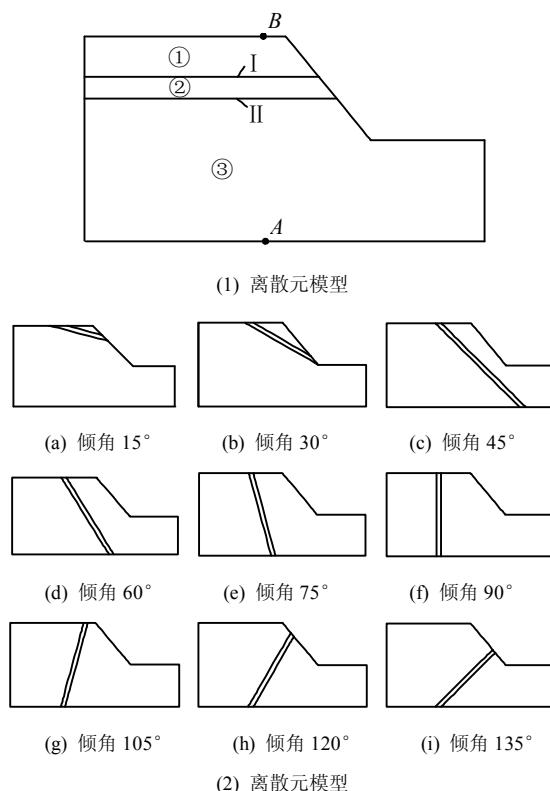


图 1 边坡的离散元模型

Fig.1 Discrete element models of slope

表 1 岩石的力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rocks								
层号	名称	ρ /(kg/m^3)	E /GPa	ν	φ /($^\circ$)	c /MPa	K /GPa	G /GPa
①	花岗岩	2 800	46	0.23	47	1	28.4	18.7
②	页岩	2 250	11.1	0.35	14.4	0.2	12.3	4.1
③	石灰岩	2 500	28.5	0.27	40	0.5	20.7	11.2

表 2 软弱结构面的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of weak structural plane						
编号	名称	K_n /GPa	K_s /GPa	φ /($^\circ$)	c /MPa	抗拉强度 /MPa
I	结构面	≤ 11	≤ 11	14	0.2	0
II	结构面	≤ 11	≤ 11	14	0.5	0

表 3 为本次模拟实验中采用的地震波频率 f ,

地震波作用时间 t 、横波波速 C_s 和纵波波速 C_p , 并得出了模型的单元网格尺寸 Δl (见图 2)。

表 3 动力参数和单元网格的长度

Table 3 Dynamic parameters and length of the grid unit

层号	名称	C_s /(m/s)	C_p /(m/s)	f /Hz	t /s	Δl /m
①	花岗岩	2 584.3	4 364.4	4	25	10
②	页岩	1 349.9	2 810.0	4	25	10
③	石灰岩	2 116.6	3 775.4	4	25	10

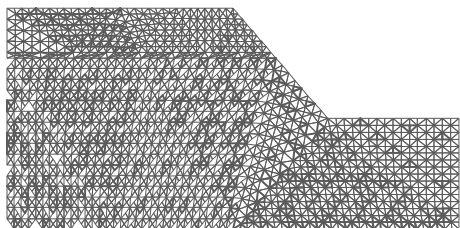


图 2 边坡离散元模型的网格划分

Fig.2 Grid division of discrete element slope model

经计算可知, 本模型所选的网格尺寸所允许的输入波的最高频率为 14 Hz, 而真实输入的动荷载最大主频率为 4 Hz, 故单元网格尺寸满足要求。

2.3 边界条件

为防止入射波的反射和失真, 模拟中的边界条件采用黏滞边界和自由场, 图 3 为边坡在地震波作用下分析模型的边界设置。由于以速度时程曲线表示的动力荷载不能直接施加到黏滞边界上, 故需要将速度时程曲线转化为应力曲线加到边界上^[11]:

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n; \sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (3)$$

式中: σ_n 为施加的法向应力荷载 (MPa); σ_s 为施加的切向应力荷载 (MPa); v_n 为输入质点的法向振动速度 (m/s); v_s 为输入质点的切向振动速度 (m/s), 其他符号意义同前。

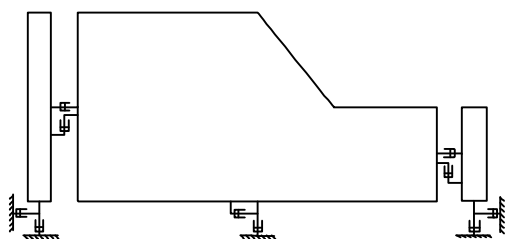


图 3 边坡动力模型边界

Fig.3 Boundary of dynamic slope model

2.4 波形输入

为了真实地模拟含软弱层岩质边坡在地震动作用下的地震动响应, 在模型底部施加水平地震波, 加速度时程曲线^[12]如图 4 所示。所施加加速度幅值

0.225g, 持续时间为 25 s, 主频为 1~4 Hz。

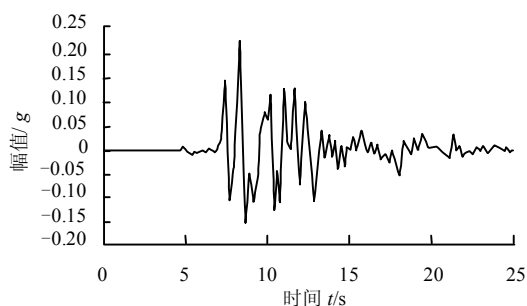


图 4 地震动速度时程曲线^[12]

Fig.4 Seismic velocity history curve

2.5 不同工况下的试验模型

通过不同的工况来研究软弱层埋深 z 、厚度 h 、弹性模量 E 、泊松比 ν 、剪切刚度 k_s 和倾角 α 等因素对边坡动力响应的影响 (岩石和结构面的力学参数见表 1、2)。工况 1: 其他条件不变, 分别计算埋深 z 为 5、20、40 m 情况下软弱层厚度 $h=1\sim10$ m 时坡顶的放大系数。工况 2: 其他的条件不变, 分别计算埋深 z 为 5、20、40 m 处 5 m 厚软弱层弹性模量 $E=5.1\sim23.1$ GPa 时坡顶放大系数。工况 3: 其他的条件不变, 计算埋深 z 为 5、20、40 m 处 5 m 厚软弱层、泊松比 $\nu=0.271\sim0.45$ 时坡顶的放大系数。工况 4: 其他的条件不变, 分别计算 5 m 厚软弱层在埋深 z 为 5、20、40 m 时软弱结构面剪切刚度 $k_s=1\sim21$ GPa 时坡顶的放大系数。工况 5: 计算软弱层倾角 α 分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 、 105° 、 120° 、 135° , 厚度为 20 m 时坡顶的放大系数。工况 1~4 分别采用 40 个离散元模型进行网格划分和分析, 工况 5 采用 9 个离散元模型进行网格划分和分析。

3 放大系数分析

在进行完动力分析后, 根据 B 点与 A 点处速度峰值的比值来定义为岩质边坡的放大系数^[6]:

$$\beta = \frac{V_{B.\max}}{V_{A.\max}} \quad (4)$$

式中: $V_{A.\max}$ 为模型底部的动力响应速度波动峰值; $V_{B.\max}$ 坡顶的动力响应速度波动峰值。

图 5~9 为不同工况下各影响因素与放大系数的关系曲线。由图 5 可见, 边坡坡顶透射波的波幅发生了不同程度的放大, 对于相同的软弱层厚度 h , 放大系数随埋深 z 的增加而增大, 即 $\beta_{40} > \beta_{20} > \beta_5$; 对相同的埋深, 放大系数也随 h 的增加而增大。

如图 6 所示, 对于相同埋深 z , 随着软弱层弹

性模量的增加,透射波的波幅逐渐降低,即放大系数逐渐减小,其中 $E = 5.1 \sim 9.1$ GPa 时的放大系数变化明显大于 $E = 9.1 \sim 23.1$ GPa 时的放大系数。对于相同的弹性模量,随着软弱层埋深的增加,边坡的放大系数逐渐增大,即 $\beta_{40} \geq \beta_{20} \geq \beta_5$, 并且,埋深 20 m 和 40 m 处放大系数较接近。

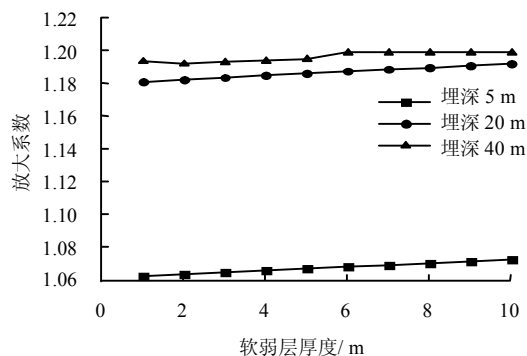


图 5 软弱层厚度与放大系数关系曲线

Fig.5 Relation curves between thicknesses of weak layer and amplification coefficients

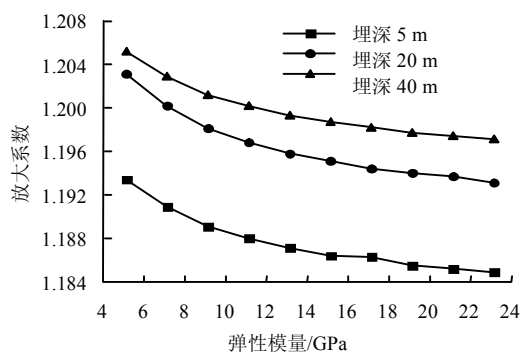


图 6 软弱层弹性模量与放大系数关系曲线

Fig.6 Relation curves between elastic modulus of weak layer and amplification coefficients

相同的埋深条件下,随着软弱层泊松比 ν 的变化,透射波的波幅变化很小,如图 7 所示。但是,对于相同的泊松比,不同埋深条件下边坡表现出了不同的放大现象,即 $\beta_{40} > \beta_{20} > \beta_5$, 埋深 20 m 和 40 m 处放大系数较接近。

如图 8 所示,对于相同的埋深,随着软弱结构面剪切刚度 k_s 的增加,透射波的波幅逐渐降低,即放大系数逐渐减小, $k_s = 1 \sim 5$ GPa 时的放大系数变化明显大于 $k_s = 5 \sim 21$ GPa 时的放大系数变化。同时也可以看出,对于相同的剪切刚度,随着软弱层埋深的增加,边坡的放大系数逐渐增大,即 $\beta_{40} > \beta_{20} > \beta_5$, 埋深 20 m 和 40 m 处放大系数较接近。

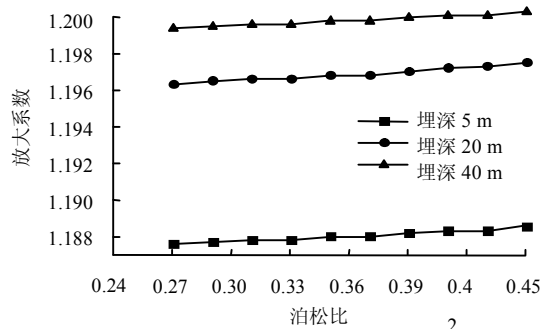


图 7 软弱层泊松比与放大系数关系曲线

Fig.7 Relation curves between Poisson's ratios of weak layer and amplification coefficients

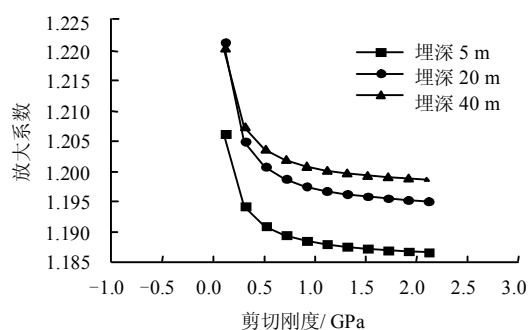


图 8 软弱结构面剪切刚度与放大系数关系曲线

Fig.8 Relation curves between shear stiffnesses of weak layer and amplification coefficients

如图 9 所示,随着软弱层倾角的增大,坡顶的放大系数并不是呈单一的增大或减小,而是呈现出先增大 ($\alpha < 45^\circ$) 后减小 ($45^\circ < \alpha < 75^\circ$),再增大 ($75^\circ < \alpha < 105^\circ$),再减小的规律 ($105^\circ < \alpha < 130^\circ$),并且在 $72^\circ < \alpha < 92^\circ$ 之间,放大系数小于 1,说明软弱层的存在减弱了地震波的传播,有利于边坡的稳定性。

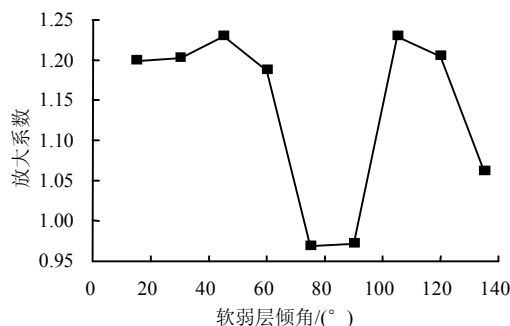


图 9 软弱层倾角与放大系数关系曲线

Fig.9 Relation curve between weak layer's dip angles and amplification coefficients

综上所述可知,软弱层的倾角、厚度、埋深、泊松比、弹性模量和剪切刚度对岩质边坡的动力响

应有很大的影响, 其中软弱层的倾角和埋深为最主要的影响因素。为了进一步研究软弱层厚度、泊松比、弹性模量和剪切刚度的影响, 采用非重复性试验二元方差分析进行判别。

4 非重复性试验二元方差分析

4.1 非重复性试验二元方差分析的评价理论

非重复性试验二元方差分析的理论是一种判定影响因素显著性大小的统计方法, 具体的分析过程如下^[13]:

设有两个因素 A 、 B 作用于总体 X , 因素 A 有 r 种水平 $A_1, A_2, \dots, A_r$, 因素 B 有 s 种水平 $B_1, B_2, \dots, B_s$, 在 A 、 B 的每一种组合水平 $A_i \times B_j$ 上做一次试验, 试验结果为 X_{ij} , $i=1, 2, \dots, r$; $j=1, 2, s$, 所有 X_{ij} 相互独立。具体试验过程见表 4。

表 4 非重复性试验二元方差分析试验过程

Table 4 Test process of non-repetitive test binary analysis of variance evaluation theory

因素 A	因素 B				X_i
	B_1	B_2	$\dots$	B_s	
A_1	X_{11}	X_{12}	$\dots$	X_{1s}	$\bar{X}_{1\cdot}$
A_2	X_{21}	X_{22}	$\dots$	X_{2s}	$\bar{X}_{2\cdot}$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
A_r	X_{r1}	X_{r2}	$\dots$	X_{rs}	$\bar{X}_{r\cdot}$
$\bar{X}_{\cdot j}$	$\bar{X}_{\cdot 1}$	$\bar{X}_{\cdot 2}$	$\dots$	$\bar{X}_{\cdot s}$	$\bar{X}$

基于最小二乘法估计, 定义各种平方和公式为总平方和:

$$SST = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{X}_{ij} - \bar{X})^2 \quad (5)$$

A 因素主效应平方和:

$$SSA = s \sum_{i=1}^r (\bar{X}_{i\cdot} - \bar{X})^2 \quad (6)$$

B 因素主效应平方和:

$$SSB = r \sum_{j=1}^s (\bar{X}_{\cdot j} - \bar{X})^2 \quad (7)$$

随机误差平方和:

$$SSE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (X_{ij} - \bar{X}_{i\cdot} - \bar{X}_{\cdot j} + \bar{X})^2 \quad (8)$$

各平方和的自由度: $f_{SST} = IJ - 1$; $f_{SSA} = I - 1$; $f_{SSB} = J - 1$; $f_{SSE} = (I - 1)(J - 1)$ 。

如果要检验 A 因素主效应的影响是否显著, 即检验假设 (认为 A 因素对总量的影响显著), 则采用以下的检验统计量:

$$F_A = \frac{SSA / (I - 1)}{SSE / [(I - 1)(J - 1)]} = \frac{MSSA}{MSSE} \quad (9)$$

当 A 因素的显著性假设检验成立时, F_A 服从分布 $F_{(I-1, (I-1)(J-1))}$, 据此分布可以计算出 P 值, 或临界

分位数。类似, 如果要检验 B 因素主效应的效果, 即假设检验 (认为 B 因素对总量的影响显著), 则采用以下的检验统计量:

$$F_B = \frac{SSB / (J - 1)}{SSE / [(I - 1)(J - 1)]} = \frac{MSSB}{MSSE} \quad (10)$$

当 B 因素的显著性假设检验成立时, F_B 服从分布 $F_{(J-1, (I-1)(J-1))}$, 据此分布可以计算出 P -value 值, 或临界分位数。将上述值列入方差分析表, 见表 5。

表 5 非重复试验二元方差分析表

Table 5 Non-repetitive test binary analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P -value
A 主效应	SSA	$I - 1$	$MSSA$	F_A	P_A
B 主效应	SSB	$J - 1$	$MSSB$	F_B	P_B
误差	SSE	$(I - 1)(J - 1)$	$MSSE$		
总和	SST	$IJ - 1$			

P 值 (P -value) 为原假设为真时所得到的样本观察结果或更极端结果出现的概率。如果 P 值很小, 说明这种情况的发生的概率很小, 如果出现了, 根据小概率原理, 就有理由拒绝原假设, P 值越小, 拒绝原假设的理由越充分。总之, P 值越小, 表明因素影响越显著。

4.2 非重复性试验二元方差分析的计算过程

计算中, 行元素取埋深, 水平分别为 5、20、40 m, 列元素依次取软弱层厚度、弹性模量、泊松比和剪切刚度。

埋深与厚度 h 的方差分析见表 6, 其影响因素的 P -value 值为 2.6×10^{-7} ; 埋深与弹性模量 E 的方差分析见表 7, 其影响因素的 P -value 值为 4.6×10^{-17} ; 埋深与泊松比 ν 的方差分析见表 8, 其影响因素的 P -value 值为 5.0948×10^{-2} ; 埋深与剪切刚度 k_s 的方差分析见表 9, 其影响因素的 P -value 为 5.22×10^{-16} 。

表 6 埋深与厚度的方差分析表

Table 6 Variance analysis of burial depths and thicknesses

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P -value
埋深	1.11562×10^{-1}	3	3.72×10^{-2}	6 660.722	7.69×10^{-39}
h	5.97×10^{-4}	9	6.64×10^{-5}	11.88 619	2.6×10^{-7}
误差	1.51×10^{-4}	27	5.58×10^{-6}		
总计	1.1231×10^{-1}	39			

表 7 埋深与弹性模量的方差分析表

Table 7 Variance analysis of burial depths and elastic modulus

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P -value
埋深	7.85×10^{-4}	2	3.92×10^{-4}	4 033.753	1.34×10^{-24}
E	2.21×10^{-4}	9	2.45×10^{-5}	252.009	4.6×10^{-17}
误差	1.75×10^{-6}	18	9.73×10^{-8}		
总计	10.07×10^{-4}	29			

表 8 埋深与泊松比的方差分析表
Table 8 Variance analysis of burial depths and Poisson's ratios

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P-value
埋深	8.06×10^{-4}	2	4.03×10^{-4}	1 060.502	2.12×10^{-19}
ν	8.36×10^{-6}	9	9.29×10^{-7}	2.443 802	5.095×10^{-2}
误差	6.84×10^{-6}	18	3.80×10^{-7}		
总计	8.21×10^{-4}	29			

表 9 埋深与剪切刚度的方差分析表
Table 9 Variance analysis of burial depths and shear stiffnesses

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P-value
埋深	9.42×10^{-4}	2	4.71×10^{-4}	469.274 4	1.56×10^{-17}
k_s	1.32×10^{-6}	10	1.32×10^{-4}	131.940 5	5.22×10^{-16}
误差	2.01×10^{-5}	20	1.00×10^{-6}		
总计	0.002 286	32			

综合 P -value 值可知, 软弱层的特性因素对边坡放大作用的影响强度从大到小依次为: 软弱层的倾角 > 埋深 > 弹性模量 > 剪切刚度 > 厚度和泊松比。

5 结 论

(1) 借助 UDEC 离散元软件, 模拟含不同倾角、埋深、厚度、弹性模量、泊松比和剪切刚度软弱层岩质边坡的动力响应, 得出了边坡坡顶的放大系数 β 。

(2) 随着软弱层倾角的增大, 放大系数呈现出增大 → 减小 → 再增大 → 再减小的规律, 并出现了地震响应减弱的现象; 放大系数随软弱层埋深和厚度的增加而增大, 但随弹性模量、剪切刚度的增大而减小, 随泊松比的增加几乎不变。

(3) 运用非重复性试验二元方差分析评价理论, 对所得出的模拟结果计算和分析, 得出软弱层的特性因素对边坡放大作用的影响强度依次为软弱层的倾角 > 埋深 > 弹性模量 > 剪切刚度 > 厚度 > 泊松比。

本文的研究手段和分析结果将有助于研究地震力作用下含软弱层岩质边坡的动力响应, 对震区边坡灾害的防治有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2586—2591.
HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2586—2591.
- [2] 刘亚群, 李海波, 李俊如, 等. 爆破荷载作用下黄麦岭磷矿岩质边坡动态响应的 UDEC 模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3659—3663.
LIU Ya-qun, LI Hai-bo, LI Jun-ru, et al. UDEC simulation on dynamic response of rock slope of Huangmailing phosphorite mine under explosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3659—3663.
- [3] 刘红星, 苏爱军, 王永平, 等. 软弱夹层对斜坡稳定性的影响分析[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2004, 28(5): 766—770.
LIU Hong-xing, SU Ai-jun, WANG Yong-ping, et al. Analysis of affection of weak seam to slope stability[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2004, 28(5): 766—770.
- [4] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 434—451.
HUANG Run-qiu. Large scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 434—451.
- [5] 杜晓丽, 宋宏伟, 魏京胜. 地震对软弱夹层边坡稳定性影响素质模拟研究[J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2010, 32(1): 39—42.
DU Xiao-li, SONG Hong-wei, WEI Jing-sheng. Numerical simulation research on stability of slope with weak sandwich under seismic loadings[J]. *Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences)*, 2010, 32(1): 39—42.
- [6] 柴红保, 曹平, 林杭. 竖直向上传播剪切波作用下边坡动力响应规律[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42(4): 1079—1084.
CHAI Hong-bao, CAO Ping, LIN Hang. Dynamic response laws of slope under vertical shear wave[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(4): 1079—1084.
- [7] 黄润秋, 余嘉顺. 软弱夹层特性对地震波强度影响的模拟研究[J]. 工程地质学报, 2003, 11(3): 312—317.
HUANG Run-qiu, YU Jia-shun. Modeling of the effects of properties of a buried weak layer on seismic waves[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11(3): 312—317.

- [8] 范留明, 李宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2456—2461.
FAN Liu-ming, LI Ning. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2456—2461.
- [9] 范留明, 闫娜, 李宁. 薄弹性软弱夹层的动力响应模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 88—91.
FAN Liu-ming, YAN Na, LI Ning. Dynamic response model for thin soft interlayer considering interbedded reflecting waves[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 88—91.
- [10] KUHLEMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1973, 99(5): 421—417.
- [11] Itasca Consulting Group. UDEC (universal distinct element code) user's manual (version 3.0)[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 1996.
- [12] 言志信, 郭斌, 贺香, 等. 多级边坡平台宽度对边坡地震动力响应及破坏机制的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 352—357.
YAN Zhi-xin, GUO Bin, HE Xiang, et al. Study of effect of platform width on dynamic response and failure mechanism of stepped slopes under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.2): 352—357.
- [13] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.