

文章编号: 1008-2786-(2016)6-732-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000180

# 地震作用下边坡及不利地质体的动力特征

张文<sup>1,2</sup> 刘勇<sup>2</sup> 王运生<sup>2</sup> 唐起<sup>2</sup> 陈怡西<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611743; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 深切谷坡浅表部卸荷裂隙发育, 风化强烈, 致使浅表层介质性质出现差异, 成为非连续介质。地震动力响应由此变得复杂。根据青川地震监测数据分析线型坡及山坳处的地震动力响应特征, 并结合适用于分析岩质边坡运动过程的不连续变形分析方法(DDA), 对不同岩质边坡及岩体中出现节理和软弱夹层等不利地质体时的动力特征进行分析, 揭示在一定高程下线型坡上地震波加速度随高程增加而增大, 且垂直山脊方向的地震波峰值加速度放大系数大于沿山脊方向, 最大可达 3.12 倍; 山坳处的地震波加速度较谷底会出现一定程度的衰减。同一规模边坡, 岩质越硬加速度放大系数越大; 当边坡中存在节理及软弱夹层时, 地震波传播会受到反射和透射的影响, 从而影响边坡的动力响应特征。分析表明, 岩体弹模较大时, 节理对地震波传播的透射作用较强, 且节理间距与输入波长的比值小于临界值时, 其比值越大, 节理对地震波的透射作用越强; 岩体分界面下部岩性较上部岩性硬时, 随着两种岩性弹模差别增大, 透射波峰值加速度降低越明显, 而反之分界面以下岩性较上部软时, 随着两种岩性弹模差别越大, 透射波加速度放大越显著; 软弱夹层厚度以及其与周围岩体波阻抗比较大时, 地震波经过软弱夹层时的透射系数较小。

**关键词:** 地震波; 加速度; 线型坡; 山坳; 节理; 软弱夹层

**中图分类号:** P315.9, P642.2

**文献标志码:** A

边坡动力问题在岩土工程与地震工程中一直广受关注。在多山地区, 由地震诱发的次生灾害中, 边坡失稳造成的破坏最为严重, 历史上由于地震导致边坡失稳造成的生命财产损失的事件数以千计。如何减少地震给人类带来的破坏已成为全球性的社会问题。

关于边坡动力响应问题的研究最早可以追溯到 1936 年, Mononobe 等人<sup>[1]</sup>第一次提出了剪切楔法模型。在余震测量中, 国外学者在卡尔山山上和山脚两点的强余震速度观测记录显示, 山顶地震持续时间显著增长, 放大效应显著, 并且位移、速度、加速度的放大效应不同<sup>[2]</sup>。祁生文通过 FLAC3D 模拟出了地震波在边坡中传播会受坡高和坡脚的影响<sup>[1]</sup>。刘汉香<sup>[3]</sup>等人通过大型振动模型试验揭示: 同种地震波及等强度作用下, 合成向、水平  $X$  向(纵

向)和竖直  $Z$  向对斜坡的变形影响依次加强。

文中通过青川东地震监测数据分析了东山底部线型坡及山脊转折部位山坳处的地震波动力响应特征, 并结合 DDA 法模拟分析不同岩性、节理及软弱夹层对岩体动力特征的影响。

## 1 非连续变形分析方法(DDA)基本理论及其改进

### 1.1 DDA 理论基础

DDA 方法是平行于有限元法的一种数值分析方法, 与有限元法区别在于它以计算不连续面的滑移、开裂和旋转等大位移的静力和动力问题。该方法有如下理论基础<sup>[4-5]</sup>: 计算几何模型由节理等结构面切割而形成的块体单元组成; 块体单元的运动

收稿日期(Received date): 2015-06-26; 修回日期(Accepted): 2015-07-14。

基金项目(Foundation item): 中国地质调查局项目(DD20160338) [China geological survey project(12120113010100DD20160338)]

作者简介(Biography): 张文(1985-), 男, 山西临汾人, 硕士, 工程师, 从事地质工程专业研究 [Zhang Wen(1985-), male, born in Linfen, Shanxi, M.Sc. engineer, engaged in geological engineering] E-mail: 3463287@qq.com

和变形由切向应变、法向应变、位移和转动组成, DDA 方法以各块体单元的位移量为未知量; 块体运动过程中各单元之间可以接触, 也可以分离, 但必须满足库仑准则和块体间无嵌入、无拉伸条件; 结合边界条件, 通过最小势能原理把块体间的接触问题和块体本身的变形问题统一到矩阵中求解, 得出总体平衡方程; 采用基于时步的隐式方法求解方程组, 也可得出块体系统平衡时的位移场、应力场等, 还可以得出各块体在运动过程中的相对位置和接触关系。

DDA 自 1986 年提出后, 受到国内外岩土工程界的广泛关注, 其有效性也被国外业界所证明<sup>[6]</sup>。

### 1.2 地震波输入方式及人工边界条件的改进

目前 DDA 的研究主要针对自然边坡, 对地震荷载的处理方式主要有两种: 1. 不考虑地震波在介质中传播的影响, 直接将已知地震荷载以体力的形式加到所有块体上<sup>[7]</sup>; 2. 考虑地震波在介质中的传播, 通过使底部块体位移与地震波时程一致, 而不考虑地震波在介质中传播产生的散射波在穿过底部边界向无限区域传播时的反射问题<sup>[8]</sup>。这两种地震波的处理方式不利于地震波在边坡中传播规律的分析。对 DDA 方法的主程序分析, 以第二种地震荷载的处理方法为基础, 基于粘性边界理论, 对相应 DDA 程序进行改进, 在形成的底部边界上建立人工边界条件, 使在介质中产生的散射波在穿过人工边界时不向无限区域发生反射。

DDA 方法中的人工边界条件主要是基于粘性边界理论, 建立粘性边界, 通过在边界上所有块体的法向和切向设置阻尼器, 以吸收地震波输入边界上的反射波。粘滞边界在地震波传播的数值模拟中应用较广, 其中阻尼器提供的切向和法向阻尼应力为

$$f_s = -\rho c_s v_s \quad (1)$$

$$f_n = -\rho c_p v_n \quad (2)$$

式中  $f_s$  为切向阻尼应力,  $f_n$  为法向阻尼应力,  $\rho$  为介质密度,  $c_s$ 、 $c_p$  分别为 S 波和 P 波在介质中的传播速度,  $v_s$ 、 $v_n$  分别为地震波在边界输入处质点速度的切向分量和法向分量。 $c_s$ 、 $c_p$  的求解可按式:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

式中  $E$ 、 $\nu$  分别为介质的弹性模量和泊松比。

根据粘性边界上阻尼应力计算公式, 边界上的作用力是由边界质点速度分量计算得出的, 若直接将地震加速度荷载施加到边界上, 粘性边界的阻尼

器将失去作用, 所以这里需要将地震加速度荷载转化为应力时程, 再将其施加到底部边界的所有块体上。

应力时程可以由地震波速度时程采用下式得出<sup>[1]</sup>

$$\sigma_s = -2\rho c_s v'_s \quad (5)$$

$$\sigma_n = -2\rho c_p v'_n \quad (6)$$

对于加速度时程需要将其积分转化为速度时程, 再利用(5)式和(6)式转化为相应的应力输入。根据 Kuhlemeyer 等人<sup>[9]</sup>的研究, 数值模拟中, 模型网格剖分的尺寸受输入波的最短波长控制, 设置网格的尺寸应小于输入波最短波长的 1/10 ~ 1/8。

### 1.3 DDA 粘聚力处理的改进

在 DDA 计算中, 块体在其边界处发生相互接触, 分为三种类型进行识别: 角对角、角对边和边对边接触。其中边对边可转化为两个角对边的接触。这三种接触最终转换为点和线相交形式, 并根据两者的相对位置, 通过不等式计算判定其是否存在相互接触关系。根据接触面各法向和切向接触力的大小, 各接触点可存在“张开”、“滑动”和“锁定”三种状态。程序在计算中, 若接触状态由“锁定”转换为“滑动”和“张开”时, 界面的粘聚力将会被移除。即 DDA 在计算中, 若块体出现相对位移时, 接触面上的粘聚力将不存在。这样处理粘聚力能够反应滑动摩擦特性的真实界面力学行为, 但由于滑移状态的确定完全依赖于接触力计算的准确性, 实际上接触力的计算并不能达到理想的计算的精度, 这也就导致了并不准确的滑移判断使得粘聚力被不合理的移除, 从而滑移面上的抗滑力迅速降低。而通过程序修改将粘聚力的去除与否通过界面相对滑动位移判断时, 程序的计算将避免由于接触力计算的精度带来的不准确性。笔通过大量算例计算发现, 在岩质边坡计算中将判定粘聚力去除与否的位移阈值设为 0.001 2 m 时, 模拟计算结果与解析值的误差最小。

## 2 青川东山地震监测数据分析

青川东山监测剖面位于四川盆地北部边缘, 处于龙门山造山带与秦岭造山带的交汇部位, 自从“5·12”汶川地震后, 余震一直持续, 从 2009 年 9 月开始监测至今, 共监测到 125 次余震数据, 其中 > 4.5 级的有 3 次, 介于 3.0 ~ 4.5 级的有 23 次, < 3.0 级的有 99 次。根据东山地质地形条件(如图 1)在

斜坡不同高程处布置了 5 个斜坡监测平硐(如图 2),各监测点均采用了中国地震局工程力学研究所 941B 型超低频测振仪和 G01NET 斜坡动力响应监测仪。

如图 2 所示,东山斜坡走向近东西向,斜坡底部为线型坡,坡度约为  $45^\circ$ ,其上分别部署了 1#、2#及 3#监测点;4#监测点处于东山单薄的山脊上;5#监测点位于东山山脊转折处的山坳中,其高程和 4#监测点相当。

### 2.1 东山底部线型坡动力响应特征

分析 1#、2#及 3#监测点数据,其典型的加速度时程曲线图如图 3 所示,其峰值加速度随高程增加而增大,其中监测点 3 南北向峰值加速度较坡底监测点 1#放大约 2.0 倍。选取震级  $>3$  级且监测数据完整的 9 次地震数据,做出其峰值加速度放大系数曲线图如图 4 所示。

从图 3 和图 4 可以看出,在线型坡上地震波的峰值加速度随高程增加而增大,垂直山脊方向的水平峰值加速度放大倍数比沿山脊方向大,其中监测点 3 近垂直山脊方向的水平向峰值加速度放大倍数最大可达 3.12 倍。这与祁生文<sup>[1]</sup>通过 FLAC3D 模拟边坡动力响应特征的结果基本相符:当坡高小于 150 m 时,地震波峰值加速随高程增加而增大;而当坡高超过 150 m 时,地震波的峰值加速度不再随高程递增,而是呈现节律性变化,时而增大,时而减小。

### 2.2 东山山坳处动力响应特征

监测点 5 处于山脊转折部位的山坳处,其高程大于监测点 3,分析监测点 5 所记录的地震波数据并将其与测点 1 对比,做出其峰值加速度放大系数曲线图(图 5)(所选地震事件震级均  $>3$  级)。

从图 5 中可以看出,虽然监测点 5 的高程比测点 3 高,但位于山坳处的测点 5 的各分量峰值加速

度并不如线型坡那样随高程而增大,反而沿山脊方向及竖直方向的加速度分量比坡底监测点的加速度小,约为坡底加速度的 40%~90%,出现衰减之势,仅垂直山脊方向的峰值加速度会出现略微的放大。由于部署监测点的山脊与主山体近垂直,测点 5 处于山脊与主山体转折的山坳处,在山脊与主山体的作用下,测点受到沿山脊方向和竖直向的约束力较强,因而在地震作用下,山坳处沿山脊方向和竖直向的峰值加速度会出现明显的衰减。

## 3 边坡动力响应特征的数值分析

通过青川东山地震监测数据分析了东山线型坡及凹陷地形的地震波动力特征,但当岩性不同以及边坡中出现节理和软弱夹层时,边坡的动力特征会受到怎样的影响还不得而知。为探索在其影响下边坡动力特征的变化,文中采用 DDA 法,通过大量数值模拟计算进行分析。

### 3.1 不同岩性下边坡动力响应特征分析

建立坡高为 60 m,坡度为  $40^\circ$  的模型,计算不同岩性下边坡的动力特征。分别取弹性模量为  $2 \times 10^3$  MPa,泊松比为 0.21,密度为  $2\ 600\text{ kg/m}^3$  及弹性模量为  $5.4 \times 10^3$  MPa,泊松比为 0.21,密度为  $2\ 600\text{ kg/m}^3$  时的不同材料,并在边坡底部加一垂直向上的剪切波,输入波设置为  $a = 0.3\ g(\frac{2\pi t}{T})$  的正弦波,其周期  $T$  取 0.2 s。式中  $g$  指重力加速度,数值大小为  $9.8\text{ m/s}^2$ , $T$  为输入波的周期, $t$  为输入波的振动时间。在坡内各块体中设置监测点,以分析整个边坡各个部位的动力响应特征的变化,提取各监测点在整个计算时程中的加速度峰值,定义任意一点加速度峰值与坡脚处加速度峰值的比值为地震波的放

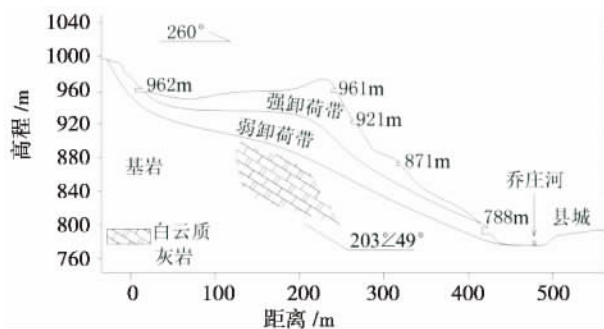


图 1 东山监测点剖面图

Fig. 1 Monitoring profiles at Dongshan

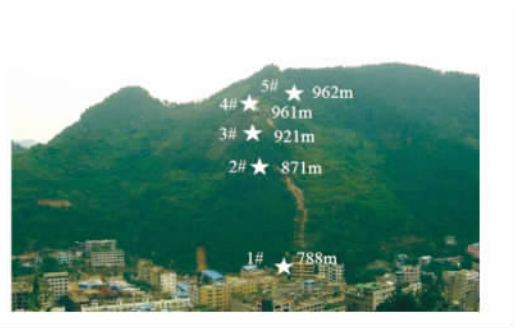


图 2 青川东山监测点部署图

Fig. 2 Monitoring locations along Qingchuan Dongshan profile

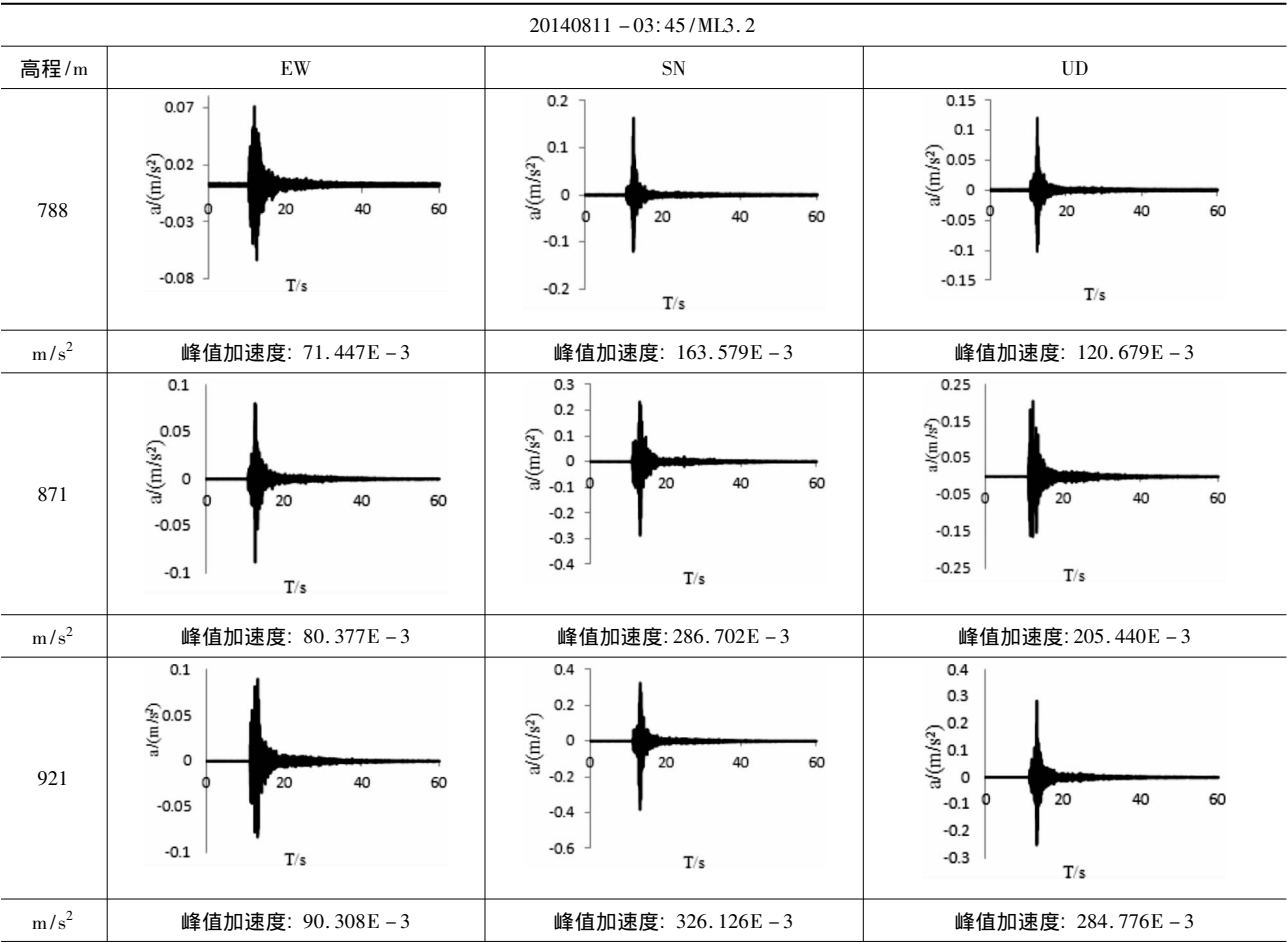


图 3 青川东山典型加速度时程曲线图

Fig.3 Typical monitoring acceleration time history curve of Qingchuan Dongshan

大系数,并在坡体内绘制放大系数的等值线图如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,同一边坡,岩性较软的坡体和较硬的坡体加速度放大系数等值线分布形式基本相同,但较软的岩质边坡比较硬的岩质边坡放大系数增加幅值小,即同一坡面,若岩质越硬则地震波加速度放大系数越大。

3.2 节理对边坡动力响应特征的影响

当坡体中有节理出现分界面时,地震波传播经过节理面会出现反射及透射,从而影响边坡动力响应特征。定义节理面两侧透射波与入射波的峰值加速度的比值为地震波经过节理面的透射系数,即:  $\alpha = \frac{T'}{T}$   $\alpha$  为透射系数,  $T'$  为地震波穿过节理面后的透射波峰值加速度,  $T$  为入射波的峰值加速度。

蔡军刚等人<sup>[10,11]</sup>提出了节理间距会影响地震波的传播,本次采用 DDA 法建立模型分析节理间距及岩性刚度对地震波传播规律的影响,建立长 200

m,宽 100 m 的模型如图 7,模型材料弹性模量为  $5.4 \times 10^3$  MPa,泊松比为 0.21,密度为  $2\ 600\text{ kg/m}^3$ ,不计重力。模型中设置两条真实节理并在底部和顶部设置测点以监测入射波和透射波的变化,设置虚节理细分模型(单元块体尺寸为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ),虚节理参数设置较大以保证块体的连续性,模型两侧及底部边界依然采用粘滞边界条件,在底部输入周期为 0.2 s 的正弦波。

Schoenberg<sup>[12]</sup>等人根据弹性理论也推导出了弹性波垂直入射单个节理面的透射系数,即

$$\alpha = \left[ \frac{4 \left( \frac{k_n}{Z\omega} \right)^2}{1 + 4 \left( \frac{k_n}{Z\omega} \right)^2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{4K_n^2}{1 + 4K_n^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中  $k_n$  为节理两侧岩石的弹性模量;  $Z$  为波阻抗,即岩体密度与入射波波速的乘积;  $\omega$  为入射波的圆频率  $K_n$  为岩石的标准弹模  $K_n = k_n / (Z\omega)$ 。

在图 7 节理面模型中先设置一条真实节理,通

过改变模型的弹性模量,计算不同弹模下节理面的透射系数并将其与理论公式(式 7) 计算值比较,以验证 DDA 模拟节理对地震波传播的影响是否合理。表 1 为数值模拟值与理论公式计算值的对比。

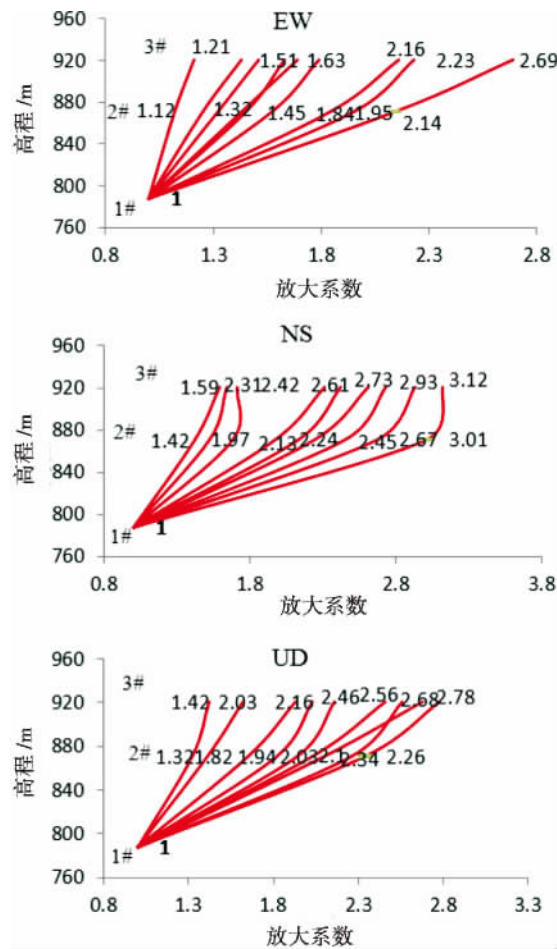


图 4 监测点峰值加速度放大系数曲线图

Fig. 4 Monitoring data of three-component amplifications for the monitoring points

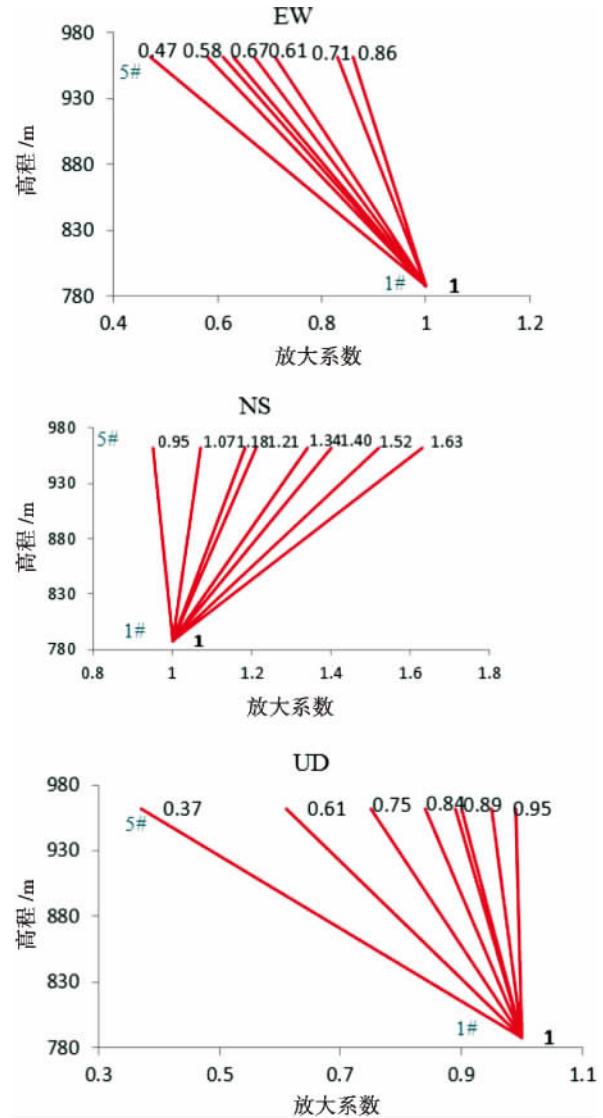


图 5 监测点峰值加速度放大系数曲线图

Fig. 5 Monitoring data of three-component amplifications for the monitoring points

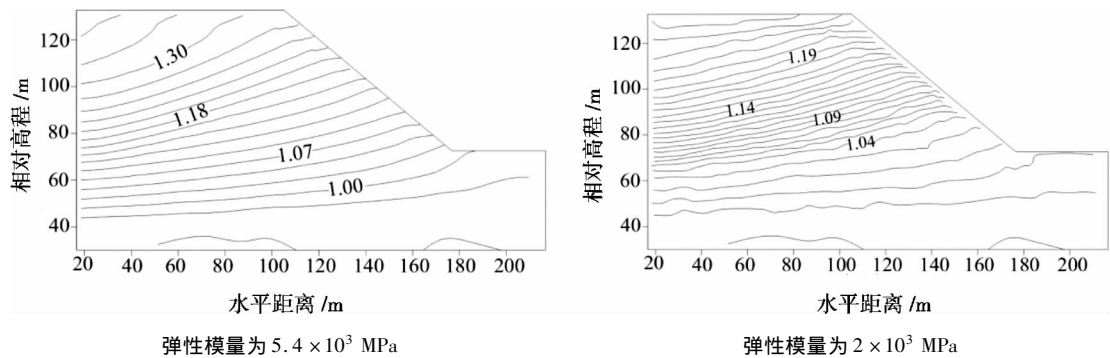


图 6 不同弹模下边坡的动力响应特征

Fig. 6 Dynamic response of elastic modulus under different slope



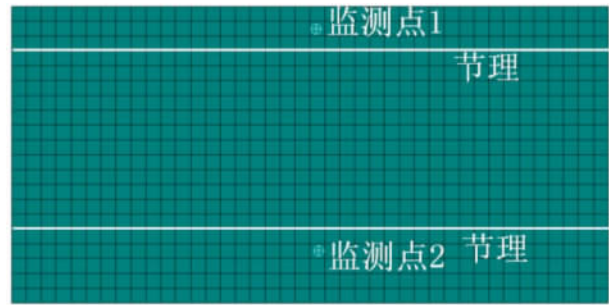


图 7 节理面分析模型

Fig. 7 Jointed surface's analysis model

表 1 透射系数模拟值与理论值对比

Tab. 1 Coefficient of analog transmission compared with theoretical results

弹性模量 $k_n / (\text{MPa})$	透射系数		误差 / %
	DDA 模拟值	理论计算值	
$5.4 \times 10^3$	0.724	0.758	4.49
$8 \times 10^3$	0.735	0.761	3.42
$12 \times 10^3$	0.812	0.831	2.29
$16 \times 10^3$	0.883	0.897	1.56
$18 \times 10^3$	0.892	0.904	1.33
$22 \times 10^3$	0.913	0.925	1.30

从表 1 中可以看出,DDA 模拟值与理论值误差较小,最大为 4.49%,故采用 DDA 模拟节理面对地震波传播的影响是合理的;通过计算不同弹性模量下的透射系数,可以发现,随着岩性弹模增大,地震波的透射系数增加,即越硬的岩体节理面对地震波的反射作用越弱,透射作用越强。因而在硬岩边坡中,节理面对边坡的动力响应特征影响较小。

在图 7 模型中改变两条节理间的间距来模拟节理间距对透射系数的影响,其结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,节理间距  $< 35 \text{ m}$  时,随间距增加透射系数增大;当节理间距超过  $35 \text{ m}$  时,透射系数随节理间距成递减趋势;当节理间距超过  $60 \text{ m}$  时,随间距增大地震波的透射系数基本不再变化。根据 Schoenberg 等人的研究,节理间距对透射系数的影响与入射波的波长也有关系,利用式 (3) 及入射波特征周期算出入射波长为  $305.8 \text{ m}$ ,当节理间距与波长比值  $\varepsilon$  为  $0.11$  时,透射系数达到临界值,节理间距与波长比值  $\varepsilon$  为  $0.20$  时,透射系数达到阈值,即节理间距与波长比值  $\varepsilon < 0.11$  时,透射系数与近似正相关,当  $\varepsilon > 0.11 < 0.20$  时,透射系数与  $\varepsilon$  呈递减趋势,  $\varepsilon$  达到阈值后,透射系数基本不再变化。因

此,当节理间距与波长比值较小时,地震波的透射系数较小,对边坡动力响应特征影响较大,  $\varepsilon$  达到临界值时,透射系数最大,对边坡动力响应特征影响最小。

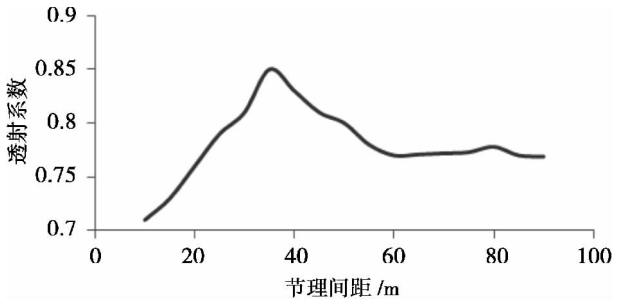


图 8 透射系数与节理间距的关系

Fig. 8 Relationship of transmission coefficient with joint pitch

### 3.3 软弱夹层对边坡动力响应特征的影响

当坡体中出现软弱夹层时,岩体整体性受到破坏,出现不同介质分界面,地震波的传播会受到影响,为了简化计算,本次只计算一层软弱夹层的影响。首先采用 DDA 方法模拟地震波在不同介质分界面上的传播规律,建立模型如图 9 所示,模型长  $200 \text{ m}$ ,宽  $100 \text{ m}$ ,模型上部岩性的弹模为  $5.4 \times 10^3 \text{ MPa}$ ,泊松比为  $0.21$ ,密度为  $2600 \text{ Kg/m}^3$ ,不计重力,通过改变分界面以下岩性的弹性模量来计算不同分界面对地震波透射系数的影响,并将数值模拟值与理论公式计算值比较以验证 DDA 对分界面的模拟是否合理。在模型底部输入周期为  $0.2 \text{ s}$  的正弦波,模型两侧及底部依然采用粘滞边界。

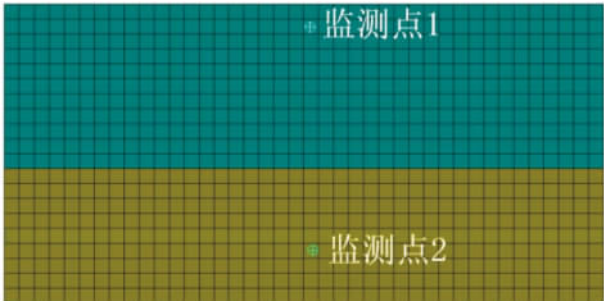


图 9 不同介质分界面模型

Fig. 9 Different media interface model

廖振鹏<sup>[13]</sup>等人通过对分界面上的应力及位移的连续条件进行分析,推导出了弹性波在分界面上的透射和反射系数公式

$$a_r = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} a_i \tag{8}$$

$$a_h = \frac{2}{1 + \varepsilon} a_i \tag{9}$$

式  $\varepsilon$  为上下介质的波阻抗比,  $a_i$ 、 $a_r$  及  $a_h$  分别为入射波、反射波及透射波的峰值加速度。改变模型中分界面以下岩性的弹性模量, 并通过两测点的峰值加速度计算分界面的透射系数, 将其与式(8)和式(9)计算得到的理论透射系数进行比较, 如表2所示。

表2 分界面透射系数模拟值与理论值对比

Tab.2 Comparison of analog interface transmission coefficient with theoretical results

弹性模量 $k_n / (\text{MPa})$	透射系数		误差 / %
	DDA 模拟值	理论计算值	
$20 \times 10^3$	0.742	0.758	2.13
$15 \times 10^3$	0.743	0.769	3.42
$10 \times 10^3$	0.782	0.816	4.17
$5.4 \times 10^3$	0.982	1	1.79
$3 \times 10^3$	1.258	1.271	1.03
$2 \times 10^3$	1.321	1.403	5.81
$0.8 \times 10^3$	1.722	1.765	2.45
$0.4 \times 10^3$	1.853	1.912	3.08

从表2中数据可以看出, DDA 计算值与理论公式计算值误差较小, 故采用 DDA 对地震波经过分界面透射系数的计算是合理的。当分界面下部岩性较上部岩性硬时, 地震波在经过分界面时其峰值加速度会降低, 随着两种岩性弹模差别增大, 地震波峰值加速度降低越明显; 分界面以下岩性较上部软时, 地震波经过分界面时, 其加速度峰值会增大, 且随两种岩性弹模差值越大, 加速度放大越明显。

岩体中存在软弱夹层时, 地震波传播会遇到多个分界面。分界面上产生的反射波与入射波会出现干涉现象, 从而影响地震波经过软弱夹层时的透射系数, 其干涉现象的强弱与软弱夹层的厚度有关。建立模型如图10所示, 模型长200 m, 宽100 m, 模型岩性的弹模为  $10 \times 10^3$  MPa, 泊松比为0.21, 密度为  $2\,600 \text{ kg/m}^3$ , 软弱夹层的弹模为  $1 \times 10^2$  MPa, 泊松比为0.21, 密度为  $2\,600 \text{ kg/m}^3$ , 模型底部输入周期为0.2 s的正弦波, 两端及底部依然采用粘滞边界。变化软弱夹层的厚度, 计算不同厚度下的透射系数, 模拟计算结果如图11。从曲线图可以看出, 软弱夹层厚度减小时, 透射系数增大明显, 这主要与随厚度减小分界面上多重反射效应越来越强有关,

当厚度达到8 m时, 透射系数基本不再变化。根据输入波长, 可以求出软弱夹层厚度与波长比值约达0.03时, 其透射系数不再随厚度增加而变化。

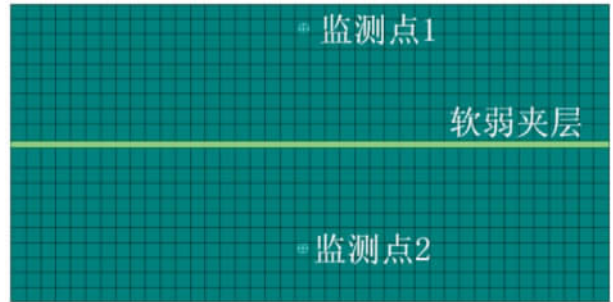


图10 软弱夹层分析模型

Fig.10 Weak interlayer's analysis model

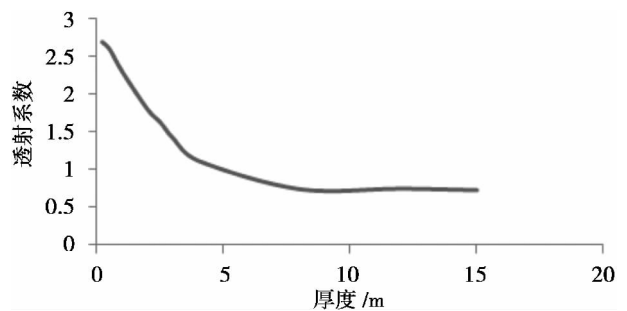


图11 透射系数与软弱夹层厚度的关系

Fig.11 Relationship of transmission coefficient with weak interlayer thickness

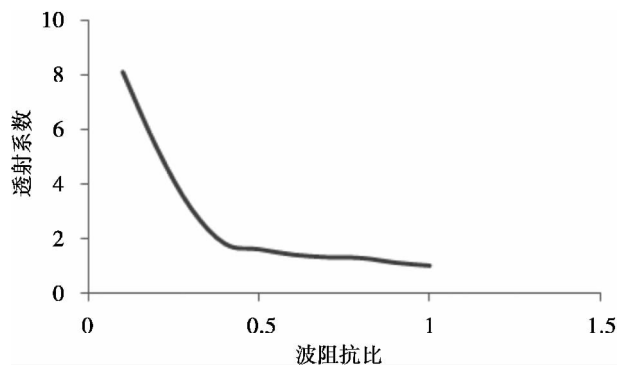


图12 透射系数与波阻抗比的关系

Fig.12 Relationship of transmission coefficient with wave impedance transmission coefficient ratio

式(8)和式(9)求分界面反射波和透射波的峰值加速度公式与上下介质的波阻抗比也有关系, 其影响规律可以利用 DDA 通过改变软弱夹层的弹模来模拟不同波阻抗比对软弱夹层透射系数的影响。在上图10模型中设置软弱夹层的厚度为3 m, 变化

软弱夹层的弹模(改变软弱夹层与周围岩性的波阻抗比),其他参数不变,透射系数的计算结果如图12所示。从图中可以看出,当波阻抗比小于0.38时,随波阻抗比增加,透射系数下降明显;当波阻抗比超过0.38时,透射系数与波阻抗比依然呈递减趋势,但下降不再明显。因此,当软弱夹层厚度以及其与周围岩体波阻抗比较大时,波经过软弱夹层的透射系数较小,对边坡的动力特征影响较大。

## 4 结论

文中根据青川地震监测数据分析了青川东山西部线型坡及山脊转折部位山坳处的地震动力响应特征,并采用DDA法通过模拟计算并分析了不同岩性及岩体中出现节理和软弱夹层时边坡动力特征所受到的影响,主要结论有:

1. 高程一定时,线型坡上的地震波加速度随高程增加而增大,垂直山脊方向的加速度放大倍数大于沿山脊方向,最大放大倍数可达3.12倍。

2. 位于山脊转折部位山坳处的地震波加速度较谷底会出现一定程度的衰减,而不随高程增加而增大。

3. 相同规模边坡,岩性较软的坡体和较硬的坡体加速度放大系数等值线分布形式基本相同,较软的岩质边坡比较硬的岩质边坡放大系数增加幅值小,即同一坡面若岩质越硬则地震波加速度放大系数越大。

4. 弹性模量越大的岩体中,节理面对弹性波的透射作用越强,反射作用越弱;当节理间距与波长比值较小时,地震波的透射系数较小,对边坡动力响应特征影响较大,其比值达到临界值时,透射系数最大,对边坡动力响应特征影响最小。

5. 岩体中存在不同物理力学性质的岩性分界面时,当分界面下部岩性较上部岩性硬时,随着两种岩体弹模差别增大,透射波峰值加速度降低越明显;反之当分界面以下岩性较上部软时,随两种岩体弹模差值越大,透射波加速度放大越明显。

6. 软弱夹层厚度以及其与周围岩体波阻抗比较大时,地震波经过软弱夹层的透射系数较小,对边坡的动力特征影响较大。

## 参考文献(References)

[1] 祁生文,伍法权,孙进. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2003, 33(增刊): 28-40 [Qi Shengwen, Wu

Faquan, Sun Jin. Analysis of dynamic response of slopes[J]. Science in China(Series E: Technology Science) 2003, 33(S): 28-40]

[2] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 2009: 181-182 [Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng et al. Geological analysis of engineering principles[M]. Beijing: Geological press 2009: 181-182]

[3] 刘汉香,许强,徐鸿彪,等. 斜坡动力变形破坏特征的振动台实验模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 334-339 [Liu Hanxiang, Xu Qiang, Xu Hongbiao, et al. Shaking table test model of slope deformation and failure characteristics of power[J]. Rock and soil mechanics 2011, 32(Suppl. 2): 334-339]

[4] Shi Genhua. Contact theory [J]. China Science: Technological Sciences 2015, 58(5): 1-47

[5] 付晓东,盛谦,张勇慧,等. DDA方法在波动问题计算中的初步研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(02): 70-75 [Fu Xiaodong, Sheng Qian, Zhang Yonghui, et al. Preliminary study in the calculation of wave problems using DDA method [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science 2012, 44(02): 70-75]

[6] Maclaughlin M M, Doolin D M. Review of validation of the discontinuous deformation analysis (DDA) method [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(4): 271-305.

[7] Hatzor Y H, Arzi A A, Zaslavsky KY Y, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the DDA method: King Herod's Palace, Masada, Israel [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2004, 41(5): 813-832

[8] WU J H. Seismic landslide simulations in discontinuous deformation analysis [J]. Computers and Geotechnics 2010, 37(05): 594-601

[9] Kuhlemeyer R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems [J]. Soil Mech & Foundations Div ASCE, 1999( SM5): 421-427

[10] Cai J G, Zhao J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2000, 37(4): 661-682

[11] 张勇慧,付晓东,盛谦. 基于DDA方法的不利地质结构对弹性纵波传播规律的影响研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(5): 86-92 [Zhang Yonghui, Fu Xiaodong, Sheng Qian. Effect research of unfavorable geologic structure on elastic p-wave propagation using DDA method [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science 2012, 44(5): 86-92]

[12] Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces [J]. Journal of Acoustic Society of America 1980, 68(5): 1516-1521

[13] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [Liao Zhengpeng. Introduction to project wave theory [M]. Beijing: Science Press 2002.]

[14] Cheng X L, Miao Q H, Wang Y, et al. Design and implementation of software architecture for DDA [G]//Frontiers of Discontinuous Numerical Methods and Practical Simulations in Engineering and Disaster Prevention. Guangqi Chen, Yuzo Ohnishi, Lu Zheng et al (Eds). 2013: 147-152]



## Analysis of Dynamic Characteristics of Slope and Unfavorable Geological Body Under Earthquake

ZHANG Wen<sup>1 2</sup>, LIU Yong<sup>1 2</sup>, WANG Yunsheng<sup>1</sup>, TAN Qi<sup>1</sup>, CHEN Yixi

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Exploration Technology CAGS, Chengdu 611743, China)

**Abstract:** In the superficial part of the deep valley, the unloading fractures are developed and the weathering is intense. As a result, the superficial layer becomes a discontinuous medium and the nature of the medium is different. Thus the seismic response becomes complicated. Based on the Qingchuan earthquake monitoring data, the seismic response characteristics of linear slope and col are analyzed, and combined with the discontinuous deformation analysis (DDA) which is suitable for analyzing rock slope movement process, the dynamic characteristics of different rock slopes and rock masses are analyzed when there are joint and weak interlayer and other unfavorable geologic bodies. It is revealed that the acceleration of seismic wave on the linear slope of a certain elevation increases with the elevation, and the peak acceleration amplification coefficient of the seismic wave in the direction of vertical ridge is larger than that of the seismic waves along the ridge, and the maximum is 3.12 times; The acceleration of the seismic wave at the col is attenuated to a certain extent compared with that of seismic wave at the bottom; In the same scale slope, the harder the rock mass is, the larger the acceleration amplification coefficient is; When there are joints and weak interlayers in the slope, the seismic wave propagation will be affected by the reflection and transmission, thus affecting the dynamic response characteristics of the slope. The analysis shows that when the elastic modulus of the rock mass is large, the transmission effect of the joint on seismic wave propagation is stronger, and when the ratio of joint spacing and input wavelength is less than critical value, the greater the ratio is, the stronger the transmission effect of the joint on the seismic wave; When the lithology of the lower part of the rock is harder than that of the upper part of the rock, with the increase of the difference between the two elastic modulus of the rock mass, the decrease of the peak acceleration of the transmitted wave is more obvious. While on the contrary, the lithology of the lower part of the rock is softer than that of the upper part of the rock, with the increase of the difference between the two elastic modulus of the rock mass, the acceleration of the transmitted wave increases more obviously. When the thickness of the weak interlayer and the wave impedance between the weak interlayer and the surrounding rock mass are relatively large, the transmission coefficient of seismic waves passing through the weak interlayer is smaller.

**Key words:** Seismic waves; acceleration; linear slope; col; joint; weak interlayer