

DOI: 10.11779/CJGE201605024

# 含软弱夹层顺层岩质边坡动力破坏模式的能量判识方法研究

范 刚<sup>1, 2</sup>, 张建经<sup>\*1, 2</sup>, 付 晓<sup>1, 2</sup>, 王志佳<sup>1, 2</sup>, 田 华<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学土木学院岩土工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;  
3. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610061)

**摘要:** 基于希尔伯特-黄变换和边际谱理论, 进行了含软弱夹层顺层岩质边坡的大型振动台试验, 并利用试验结果对含软弱夹层顺层岩质边坡动力破坏模式的能量判识方法进行了研究, 结果表明: 边际谱峰值和特征频率的变化能清晰地表征边坡内部的震害损伤发展过程; 地震作用下含软弱夹层顺层岩质边坡的损伤首先出现在坡肩位置, 随着地震动强度的增大, 震害损伤逐渐向低高程发展, 最终边坡在坡体中上部相对高度 0.56 处沿软弱夹层顺层剪出, 试验中坡面的位移监测结果表明坡体中上部位移出现陡增时刻晚于坡肩, 边际谱分析结果与位移监测结果吻合较好; 坡面附近的震害程度强于坡体内部; 边坡中下部特征频率发生突变, 表明坡体中下部为边坡动力响应的不连续带; 含软弱夹层顺层岩质边坡的破坏形式主要表现为边坡后缘垂直的拉裂破坏和沿边坡中上部相对高度 0.56 处软弱夹层的剪切滑出破坏, 边坡的破坏模式为拉裂-滑移-崩落式。本文提出的能量判识方法对识别边坡的破坏模式具有一定的指导意义。

**关键词:** 软弱夹层; 顺层岩质边坡; 边际谱; 振动台; 破坏模式

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)05-0959-08

作者简介: 范 刚(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程抗震方面的研究。E-mail: fg113112@126.com。

## Energy identification method for dynamic failure mode of bedding rock slope with soft strata

FAN Gang<sup>1, 2</sup>, ZHANG Jian-jing<sup>1, 2</sup>, FU Xiao<sup>1, 2</sup>, WANG Zhi-jia<sup>1, 2</sup>, TIAN Hua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Southwest Jiaotong University, Key

Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 3. Southwest Geotechnical & Design

Institute of China Nuclear Industry, Chengdu 610061, China)

**Abstract:** Based on the Hilbert-Huang transformation and marginal spectrum theory, large scale shaking table tests on rock slope with soft strata are performed. The energy method for dynamic failure mode identification of bedding rock slope with soft strata is studied according to the test results. The research results in this work show that the peak value and characteristic frequency of marginal spectrum can represent the dynamic damage development process in the rock slope clearly. In the bedding rock slope with soft strata, the dynamic damage first occurs on the slope shoulder, and then the damage location moves to the lower elevation with the increase of input seismic wave amplitude, and finally, the slope is sheared out at the location of upper soft strata. In the displacement monitoring, the displacement on the slope shoulder has fast change and then that at the upper location has quick change, that is to say, the displacement monitoring results are in agreement with the results of the marginal spectrum analysis. The dynamic damage degree near the slope face is more severe than that in the inner part of slope. The characteristic frequency in the lower-middle part is of great difference, indicating that the lower-middle part is a discontinuous zone of dynamic response for bedding rock slope with soft strata. The dynamic failure of bedding rock slope mainly includes vertical rip in the trailing edge of slope and the shearing out at the upper soft strata, that is, the dynamic failure mode of bedding slope with soft strata is a rip-slippage-avalanche mode. The proposed method will be a guide for identification of slope dynamic failure mode.

**Key words:** soft stratum; bedding rock slope; marginal spectrum; shaking table; failure mode

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2013318800020)

收稿日期: 2014-12-21

\*通讯作者

## 0 引言

在山区工程建设中,含软弱夹层的顺层岩质边坡普遍存在,且这类边坡的稳定性较低,该类边坡的存在对其周围工程建筑物的安全构成了极大威胁。在边坡周围环境不发生改变的情况下,含软弱夹层顺层岩质边坡在自然静力作用下可能处于稳定状态,但在突发性地震作用下该类边坡可能发生大规模的滑动失稳,造成灾难性的后果。目前,针对均质岩质边坡和层状岩质边坡的动力破坏模式已经取得了一些研究成果<sup>[1-4]</sup>,但是,尚无学者研究含软弱夹层顺层岩质边坡的动力破坏模型。由于这类边坡的稳定性较均质和层状岩质边坡更差,因此,这类边坡的动力破坏模式具有更大的研究意义。

以往的边坡破坏模式研究多基于模型试验或数值分析中边坡表面的位移和变形监测,未能从边坡自身特征参数和坡体内部监测物理量入手进行研究。作为处理非平稳非线性地震信号的首选方法, HHT (hilbert-huang transformation) 在联合时频域中描述原始信号时具有极高的时频分辨率,可以克服以往基于傅立叶变换和小波变换等常见信号处理方法所存在的弊端。经过 Hilbert-Huang 变换后得到的 Hilbert 边际谱表征了信号能量幅值在频率轴上的分布,与常见信号处理方法相比, Hilbert 边际谱在时频域内以能量的角度清楚地表征了工程实体结构内部的损伤特征。本文基于含软弱夹层顺层岩质边坡的大型振动台试验,对边坡内部不同位置处测点实测地震加速度时程进行 HHT 变换,在时频联合域内研究坡体内部的损伤发展过程,据此探究含软弱夹层顺层岩质边坡的破坏模式。

## 1 振动台试验概述

本试验在中国核动力研究设计院的大型地震模拟试验台上进行,该振动台拥有 6 个自由度,台面尺寸  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,最大负载  $600\text{ kN}$ ,水平向最大位移  $\pm 150\text{ mm}$ ,垂直向最大位移  $\pm 100\text{ mm}$ ,满载时水平向最大加速度  $1g$ ,垂直向  $0.8g$ ,空载时水平向最大加速度  $3g$ ,垂直向  $2.6g$ ,频率范围为  $0.1\sim 80\text{ Hz}$ 。

### 1.1 试验模型及测点布置

试验边坡模型由提前预制的模块分层砌筑而成,且砌筑时层与层之间相互错开。模块由相似材料按照

重晶石粉:砂子:石膏:水=1:0.2:1:0.2 的比例搅拌压实制成,模型的模块间用黏结材料进行黏结,黏结材料由相似材料按照重晶石:砂子:石膏:水=1:0.2:1:1 的比例现场配制而成。根据试验原型边坡的物理力学性质,模块及黏结材料的配比由前期室内试验确定,模块在试验之前预制完成,黏结材料现场配制。试验边坡模型底面尺寸为:  $170\text{ cm} \times 128\text{ cm}$  (长×宽),模型高为  $250\text{ cm}$ ,坡面坡角为  $72^\circ$ 。试验中,在模型与模型箱之间铺设泡沫材料,模拟吸波材料,以降低模型箱对输入波的反射和折射<sup>[5-6]</sup>。在试验模型内部设置了 6 个软弱夹层,每个软弱夹层厚度为  $3\text{ cm}$ ,软弱夹层倾角为  $8^\circ$ ,如下图 1 中条带所示。软弱夹层模拟材料由四川省乐山市某原型边坡软弱夹层取样之后在室内重塑得到。试验模型全貌如下图 2 所示。材料参数见表 1。

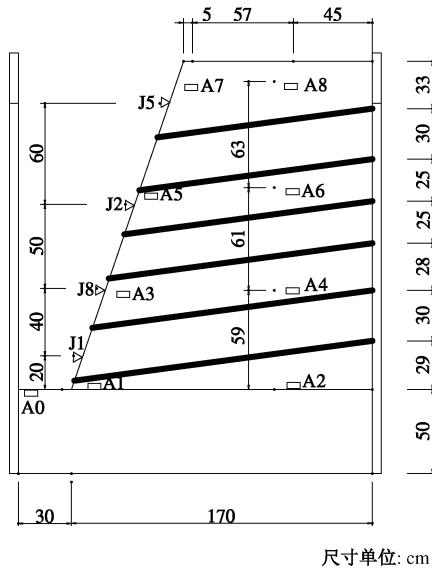


图 1 顺层边坡试验测点布置

Fig. 1 Layout of measuring points

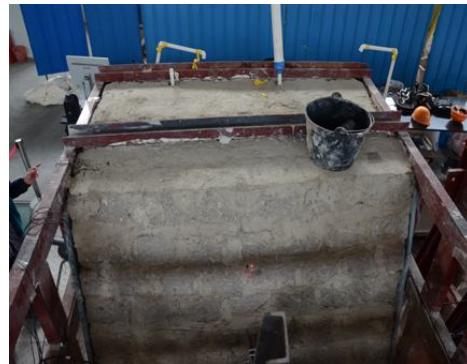


图 2 顺层边坡试验模型全貌

Fig. 2 Test model for bedding slope

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

模块					泥化夹层				
$\rho$ $/(g \cdot cm^{-3})$	$E$ $/MPa$	$\varphi$ $/(^\circ)$	$c$ $/MPa$	$\mu$	抗拉强度 $/MPa$	抗压强度 $/MPa$	$\varphi$ $/(^\circ)$	$c$ $/kPa$	$w$ $/\%$
2.4	375	35	1.2	0.16	0.05	3.2	12	0.75	8.8

根据相似理论<sup>[7]</sup>, 本次试验选取几何尺寸、质量密度和地震加速度作为控制量, 取几何尺寸相似比为 20, 质量密度和加速度相似比为 1, 推导得到本试验其他各物理量的相似比分别为弹性模量为 20, 时间为 4.47, 位移为 20, 频率为 0.224, 内摩擦角为 1, 黏聚力为 20。

试验中布置的测试原件为三向加速度计和高精度激光位移计, 三向加速度计水平向灵敏度为 173.46 mV/g, 垂直向灵敏度为 192.08 mV/g; 激光位移计灵敏度为 500 mv/mm, 测量精度为 0.001 mm。加速度传感器布置在坡体内部和坡面附近, 定义坡面附近的 A1、A3、A5、A7 为坡面测点序列, A2、A4、A6、A8 为坡内测点序列。同时在坡脚附近布置了加速度传感器, 作为计算边坡加速度放大系数的参照点, 见图 1 中的 A0 测点。激光位移计通过刚性支架固定在模型箱上, 用于测试坡面不同高度处的位移。试验中的测点布置如图 1 所示, 图中 A 表示三向加速度计, J 表示激光位移计, 图中各尺寸单位均为 cm。

## 1.2 加载工况

本次振动台试验地震波加载方向为水平  $X$  向和垂直  $Z$  向, 加载波形为汶川地震清平波, 地震波加速度峰值分别为  $0.1g$ ,  $0.2g$ ,  $0.3g$ ,  $0.4g$ ,  $0.6g$ , 水平方向输入的汶川地震清平波原波如下图 3 所示。试验中, 在每一幅值地震波加载前均对模型进行幅值为  $0.1g$  的白噪声扫描。

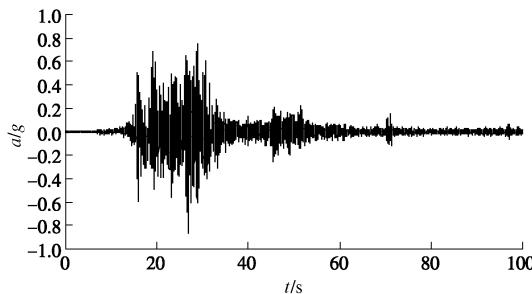


图 3 汶川地震清平波

Fig. 3 Qingping seismic wave of Wenchun Earthquake

## 2 边坡 Hilbert 边际谱辨识

### 2.1 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换的第一步是对信号进行经验模态分解(简称 EMD), EMD 假设任何复杂时间序列均是由一系列互异、非正弦函数的简单本征模态函数组成。根据这一假设, 可以从某一复杂随机时间序列中分离出频率由高到低分布的若干阶本征模态函数, 即 IMF, 每一个 IMF 均包含了原信号中该阶模态的所有模态信息。再对每一个 IMF 进行 Hilbert 变换, 最终得到原复杂随机时间序列的每一阶瞬时频率、Hilbert

谱以及 Hilbert 边际谱<sup>[8]</sup>。目前, HHT 已经在结构工程和岩土工程地震损伤识别中得到了初步运用<sup>[9-12]</sup>。

对于任意时间序列  $X(t)$  的 Hilbert-Huang 变换记为  $Y(t)$ :

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(t')}{t - t'} dt' , \quad (1)$$

式中  $P$  代表柯西主分量值, 构建解析信号  $Z(t)$ :

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{i\theta(t)} , \quad (2)$$

式中,  $a(t) = [X^2(t) + Y^2(t)]^{1/2}$  为瞬时幅值,  $\theta(t) = \arctan[Y(t)/X(t)]$  为瞬时相位。瞬时频率  $\omega(t) = d\theta(t)/dt$ 。推导得到以下解析方程:

$$Z(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t, \omega_j) e^{i \int_{\omega_j(t)}^{\omega_j(t)} dt} , \quad (3)$$

式中  $a_j(t, \omega_j)$  为第  $j$  阶 IMF 在  $t$  时刻与频率  $\omega_j$  对应的瞬时幅值。因此,  $X(t)$  在时频联合域内的幅值分布为

$$H(t, \omega) = \sum_{j=1}^n a_j(t, \omega_j) , \quad (4)$$

式中  $H(t, \omega)$  为  $X(t)$  的 Hilbert-Huang 谱。在时间轴上对  $H(t, \omega)$  进行积分, 得到  $X(t)$  的 Hilbert 边际谱  $h(t, \omega)$ :

$$h(t, \omega) = \int_0^T H(t, \omega) dt . \quad (5)$$

### 2.2 辨识原理分析

地震波在边坡内传播过程中, 若坡体中某一部位出现了震害损伤, 将导致边坡结构中的震动能量无法在该处完整地进行传递, 能量的耗损将引起边际谱幅值出现剧烈波动和突变。将上述各阶 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 可以得到反应边坡结构震动能量分布规律的边谱谱曲线和具有时变特性的瞬时频率谱。对边坡各个测点加速度时程的边际谱进行分析, 如果从坡脚到坡顶一个测点序列中各个测点的边际谱峰值基本满足线性增长规律且幅度变化较小, 说明此过程中模型中并未出现破裂。当在某一级地震荷载作用下, 边际谱特征值变化较大, 且某几个测点特征值相近, 表明模型中某些部位具有了与其他部位不一致的地震响应, 从损伤分析的角度来看, 表明在边坡中某个部位出现了震害损伤, 且位于损伤部位上方的各测点边际谱将保持基本稳定的幅值<sup>[9]</sup>。

综上所述, 对于具有一定结构的含软弱夹层顺层岩质边坡, 在地震波激励下, 一旦坡体中出现显著影响边坡结构完整性的损伤破裂时, 位于损伤部位上部各测点的幅值和特征频率必定发生显著变化, 据此可以判识出在地震波激励下坡体内部损伤破裂的发展过程, 并进一步分析可以得到边坡的动力破坏模式。

利用 Hilbert 边际谱进行边坡破坏模式研究的步骤为

(1) 对试验中边坡不同位置处实测加速度时程带通滤波后进行 EMD 分解, 得到一系列 IMF 分量。

(2) 对 IMF 进行 Hilbert 变换, 得到各个 IMF 的瞬时频率谱曲线以及 Hilbert 边际谱。

(3) 根据不同位置处各测点的 Hilbert 边际谱变化规律判定坡体内部能量分布, 并据此推断坡体内部损伤出现位置。

(4) 基于坡体内部损伤位置推断结果, 结合边坡表面位移和裂隙观测结果, 推断含软弱夹层顺层岩质边坡破坏模式。

### 2.3 边坡损伤发展过程辨识

对振动台试验中输入的汶川地震清平波进行 EMD 分解, 结果表明前四阶本征模态函数几乎包含了原信号所有的幅值成分, 因此, 本文只列举前四阶本征模态函数和瞬时频率, 如下图 4 所示。

图 4 表明, EMD 分解后的汶川地震清平波二阶本征模态函数 (IMF2) 幅值较高、频率成分丰富、辨识清晰度高, 因此, 本文选择各个监测点实测加速度记录的 IMF2 进行边际谱计算和分析。

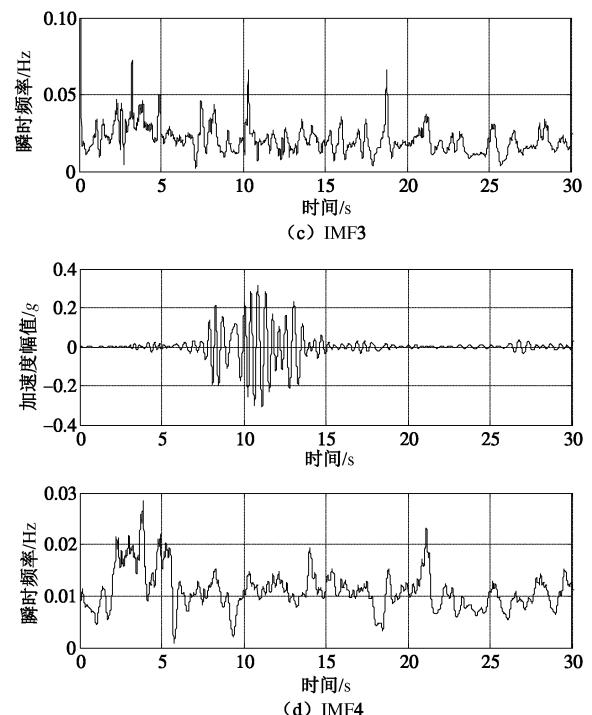
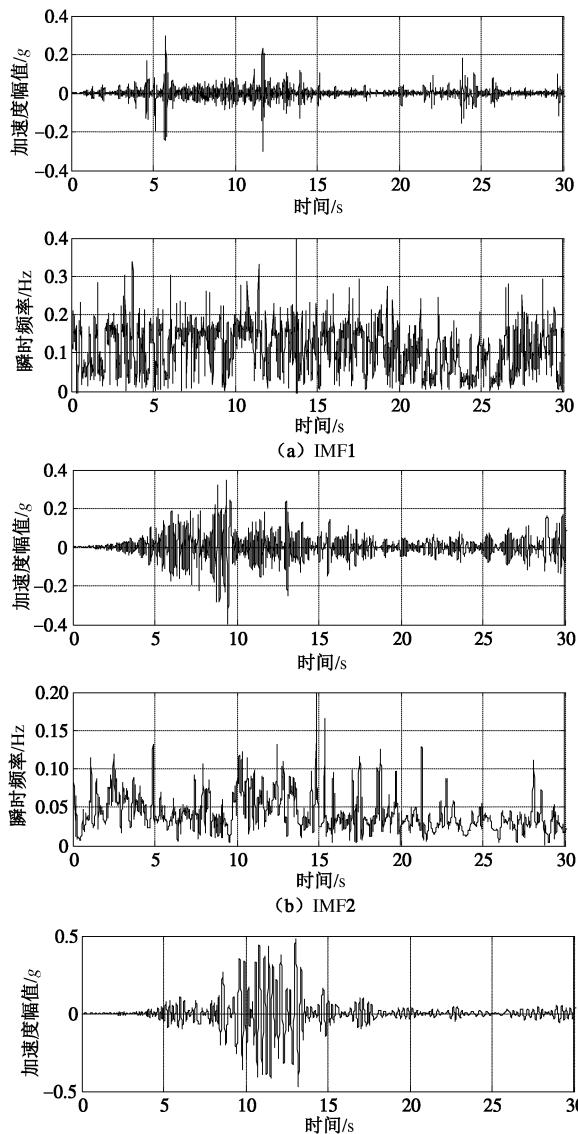


图 4 输入地震波 EMD 分解结果 (前四阶)

Fig. 4 EMD results for input seismic wave (first four orders)

对  $0.1g$ ,  $0.2g$ ,  $0.3g$ ,  $0.4g$  和  $0.6g$  汶川地震清平波作用下边坡中各测点实测加速度时程进行 HHT 变换, 得到不同幅值地震波作用下各个测点的 Hilbert 边际谱, 其中,  $0.2g$  和  $0.6g$  汶川地震清平波作用下的边际谱如下图 5~8 所示。

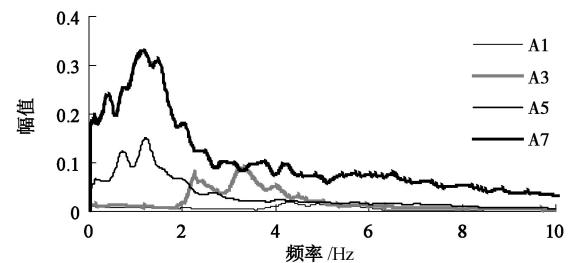


图 5  $0.2g$  清平波作用下坡面附近各测点边际谱

Fig. 5 Marginal spectra near slope face under Qingping seismic wave of  $0.2g$

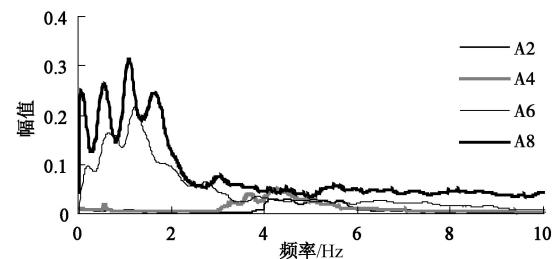


图 6  $0.2g$  清平波作用下坡内各测点边际谱

Fig. 6 Marginal spectra in slope under Qingping seismic wave of  $0.2g$

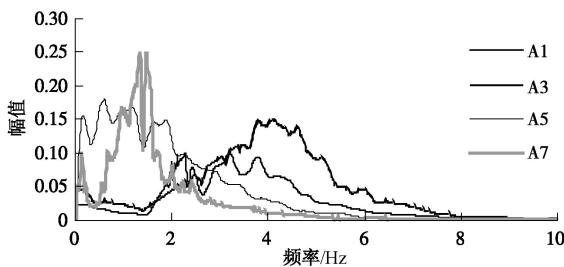


图 7 0.6g 清平波作用下坡面附近各测点边际谱

Fig. 7 Marginal spectra near slope face under Qingping seismic wave of 0.6g

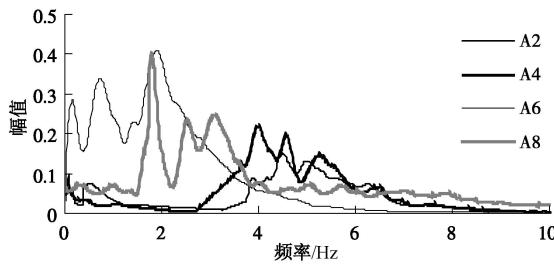


图 8 0.6g 清平波作用下坡内各测点边际谱

Fig. 8 Marginal spectra in slope under Qingping seismic wave of 0.6g

从图 5~8 可以看出, 在  $0.2g$  地震波作用下, 坡面和坡内各测点边际谱峰值随着高程的增加而增大; 在  $0.6g$  地震波作用下, 边坡中部以上的 A5 和 A7 测点, A6 和 A8 测点具有相近的边际谱峰值, 边坡中部以下的 A1 和 A3, A2 和 A4 测点边际谱峰值随着高程的增加而增大。边际谱峰值出现这样的差异说明坡体内部已经出现了震害损伤。为了进一步揭示坡体内部的损伤发展过程, 提取不同幅值地震波作用下各个测点边际谱的峰值和特征频率进行分析, 探究地震波在坡体内部自下而上传播过程中频域内能量变化特征, 如下图 9~12 所示。

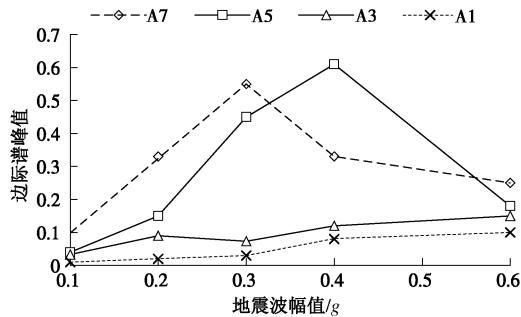


图 9 坡面附近各测点边际谱峰值

Fig. 9 Peak values of marginal spectra near slope face

上述各图反映了含软弱夹层顺层岩质边坡在地震波作用下的破坏过程。在地震波作用下, 坡体中部的 A5、A6 测点以及顶部的 A7、A8 测点出现了明显的峰值波动, 且这 4 个点的峰值高于其他测点, 表明上

述 4 点(A5~A8)在地震激励作用下出现了震害损伤。在  $0.3g$  地震波作用下, 顶部 A7、A8 测点边际谱峰值出现明显变化, 而中部的 A5、A6 测点边际谱的峰值在  $0.4g$  地震波作用下才出现明显的变化, 这表明边坡的损伤首先出现在坡肩位置, 随后逐渐向低高程发展。同时可以发现, 位于坡面附近的 A5 和 A7 测点的峰值变化幅度大于位于坡体内部的 A6 和 A8 测点, A5 和 A7 测点的特征频率整体上稍小于 A6 和 A8 测点。以上两点印证了坡面附近的破坏程度比坡体内部更加严重, 2008 年汶川地震后的震害调查发现具有含软弱夹层顺层结构特征的岩质边坡震害均表现为坡面附近震害程度强于坡体内部<sup>[13]</sup>。结合本文的研究成果, 可以得出: 具有含软弱夹层顺层结构特征的边坡震害具有趋表效应。

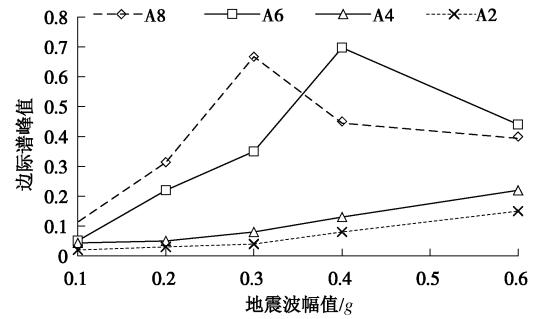


图 10 坡内各测点边际谱峰值

Fig. 10 Peak values of marginal spectrum in slope

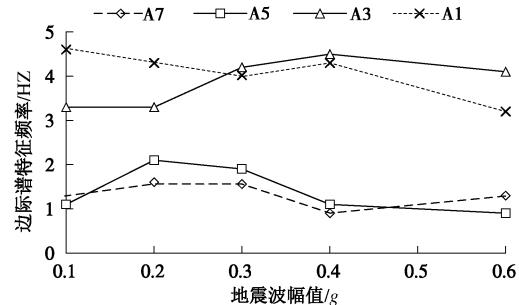


图 11 坡面附近各测点边际谱特征频率

Fig. 11 Characteristic frequencies of marginal spectra near slope face

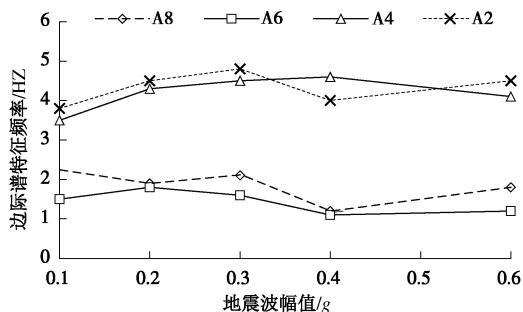


图 12 坡内各测点边际谱特征频率

Fig. 12 Characteristic frequencies of marginal spectra in slope  
试验中坡面的位移监测结果也很好的验证了上述

分析结果, 试验中坡面的位移监测结果如图 13 所示。因在  $0.6g$  地震波作用下边坡已沿下部软弱夹层剪切滑动失稳, 层间错动位移较大, 坡面位移值已超过激光位移计量程, 数据失真, 故图 13 中未包含  $0.6g$  地震波作用下坡面的位移监测数据。

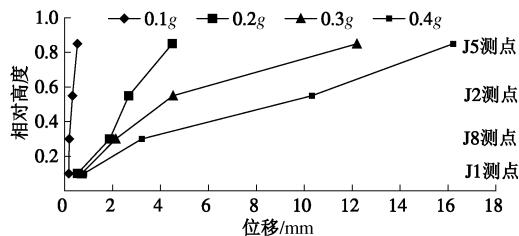


图 13 坡面位移监测结果 (模型位移)

Fig. 13 Monitoring results of displacement (for test model)

在  $0.1g$  和  $0.2g$  地震波作用下, 随着相对高度的增加, 坡面位移近似呈线性增加。 $0.3g$  地震波作用下, 坡肩 J5 测点位移较 J2 测点出现陡增, 增大幅度为 170%。 $0.4g$  地震波作用下, 坡体中上部 J2 测点位移较 J8 测点出现大幅度的增加, 增大幅度为 221%, 观察边坡模型发现此时坡体中部 J2 与 J8 测点之间出现了层间滑移。两个测点之间位移出现大幅度的增加, 说明在地震作用下两个测点之间坡体出现了竖向裂隙, 坡体结构已被破坏。以上位移监测数据清楚的表征了坡体内部破坏性裂隙的发展过程:  $0.3g$  地震波作用下坡体上部出现竖向裂隙,  $0.4g$  地震波作用下竖向裂隙进一步发展至坡体中下部,  $0.6g$  地震波作用下边坡已经沿下部软弱夹层剪切滑出破坏。

另外, 分析图 11 和图 12 可得, 坡体相对高度 0.295 与相对高度 0.6 之间一带为边坡动力响应的不连续带。以边坡表面测点序列为为例, 相对高度 0.295 的 A<sub>3</sub> 测点与相对高度 0.6 的 A<sub>5</sub> 测点特征频率存在突变, 边坡中上部的 A<sub>5</sub>、A<sub>7</sub> 测点具有相近的特征频率, 低于边坡底部的 A<sub>1</sub>、A<sub>3</sub> 测点的特征频率, 边坡内部的测点序列具有相同的规律。因此可以得到, 在地震作用下, 含软弱夹层顺层岩质边坡中下部存在动力响应的不连续带。

### 3 边坡破坏模式分析

对试验中每一级地震荷载施加后边坡的破坏现象进行描述, 可以概括边坡的破坏过程如下: 在  $0.1g$  和  $0.2g$  地震波作用下, 边坡未出现任何破坏现象; 当输入地震动幅值达到  $0.3g$  时, 边坡坡顶开始出现明显的张拉裂隙, 同时, 坡肩边缘出现局部散落体掉落, 层间无滑动; 当输入地震动幅值达到  $0.4g$  时, 边坡坡顶张拉裂隙进一步扩大, 坡肩继续有散落体掉落, 坡体

中上部层间开始出现错动现象, 如图 14 (a) 所示; 当输入地震动幅值达到  $0.6g$  时, 边坡坡顶张拉裂隙进一步发展扩大, 边坡中上部层间错动位移加大, 并沿相对高度 0.56 处软弱夹层剪切滑出, 如图 14 (b) 所示, 坡顶出现明显位移, 坡体后缘与模型箱分离, 如图 14 (c) 所示。



(a) 坡体中上部出现小幅度层间错动



(b) 坡体中上部出现大幅度层间错动



(c) 坡顶张拉裂隙, 后缘分离

图 14 坡体破坏过程

Fig. 14 Process of slope failure

梳理边坡破坏过程可以发现, 边坡的破坏主要表现形式为边坡后缘垂直的拉裂和沿软弱夹层的剪切滑动, 发生剪切滑动的泥化夹层位于坡体的中上部。在

剪切破坏过程中岩块与岩块之间破裂分离并发生相互碰撞, 形成碎屑流, 堆积于坡脚。在水平地震激励下, 岩块受到水平向地震力作用, 由于岩块间存在结构面, 岩块未能形成整体以抵抗水平地震力的影响, 岩块间被张拉形成众多竖向裂隙, 且裂隙不断由表面垂直向下延伸, 直至和泥化夹层贯通, 贯通后, 坡体被切割形成松散体, 当地震强度进一步加大时, 极易发生沿某一软弱夹层的整体失稳破坏。因此, 含泥化夹层顺层岩质边坡的破坏模式为拉裂-滑移-崩落式。

## 4 讨 论

本文探讨了利用 HHT 边际谱进行含软弱夹层顺层岩质边坡动力破坏模式的能量判识方法, 提出了该类边坡的动力破坏模式。针对实际工程中的边坡, 若边坡在服役期内遭遇破坏性地震, 基于本文提出的震害损伤能量判识方法, 通过坡体内布设的加速度传感器及相应的实时加速度监测系统, 可以得到地震作用下边坡的震害损伤情况。另外, 本文的研究对象具有特定的赋存状态, 研究成果对认识具有类似结构特征边坡的动力破坏模式具有一定的指导意义, 同时, 本文提出的能量判识方法可以应用推广于具有其他结构特征的边坡中。

## 5 结 论

本文利用大型振动台试验和 HHT 理论, 对含软弱夹层顺层岩质边坡的动力破坏模式进行了探讨, 得到以下 3 点结论。

(1) 边际谱峰值和特征频率的变化能清晰地表征边坡内部的震害损伤发展过程, 且边际谱的识别结果与试验中坡面的位移监测结果十分吻合, 地震作用下边坡的损伤首先出现在坡肩位置, 随后随着地震动强度的增大, 损伤向低高程转移, 同时发现坡面附近的震害程度强于坡体内部。

(2) 含软弱夹层顺层岩质边坡中下部存在特征频率的突变, 为边坡动力响应的不连续带。

(3) 含软弱夹层顺层岩质边坡的破坏主要表现为边坡后缘垂直的拉裂和沿边坡中上部软弱夹层的剪切滑动, 边坡的破坏模式为拉裂-滑移-崩落式。

## 参考文献:

- [1] 李安洪, 周德培, 冯君. 顺层岩质路堑边坡破坏模式及设计对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2915 - 2921. (LI An-hong, ZHOU De-pei, FENG Jun. Failure modes of bedding rock cutting slope and design countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2009, 28(S1): 2915 - 2921. (in Chinese))

- [2] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 层状岩质边坡破坏模式及稳定性的数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3300 - 3304. (LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, JIANG Xue-liang, et al. Numerical analysis of failure modes and stability of stratified rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3300 - 3304. (in Chinese))
- [3] 舒继森, 才庆祥, 郝航程, 等. 可拓学理论在边坡破坏模式识别中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 591 - 595. (SHU Ji-sen, CAI Qing-xiang, HAO Hang-cheng, et al. Use of extenics theory in recognizing failure mode of slope[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(5): 591 - 595. (in Chinese))
- [4] 李祥龙. 层状节理岩体高边坡地震动力破坏机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013: 13 - 16. (LI Xiang-long. Research of the seismic-induced failure mechanism of layered rock high slope[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013: 13 - 16. (in Chinese))
- [5] 张建经, 韩鹏飞. 重力式挡墙基于位移的抗震设计方法研究-大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 417 - 423. (ZHANG Jian-jing, HAN Peng-fei. Displacement based seismic design method for gravity retaining walls- Large scale shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 417 - 423. (in Chinese))
- [6] 曲宏略, 张建经. 地基条件对挡土墙地震土压力影响的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1228 - 1233. (QU Hong-lve, ZHANG Jian-jing. Shaking table tests on influence of site conditions on seismic earth pressures of retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1228 - 1233. (in Chinese))
- [7] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 112 - 119. (YUAN Wen-zhong. Similarity theory and statics model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998: 112 - 119. (in Chinese))
- [8] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[C]// Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903 - 995.
- [9] 李果. 强震条件下层状岩体斜坡动力失稳机理研究[D]. 成都理工大学, 2010: 141 - 153. (LI Guo. Failure mechanism of stratiform rock slope under strong

- earthquake[D]. Chengdu University of Technical, 2012: 141 - 153. (in Chinese))
- [10] 罗维刚, 韩建平, 钱 焰, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的结构损伤识别及振动台试验验证[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 31(1): 49 - 54. (LUO Wei-gang, HAN Jian-ping, QIAN Jiong, et al. Structural damage identification based on hilbert -huang transform and verification via shaking table model test[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 31(1): 49 - 54. (in Chinese))
- [11] 王 建. 地震作用下路基工程破坏机理及抗震技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 46 - 64. (WANG Jian. Research on damage mechanism under earthquake and seismic technique of subgrade engineering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010: 46 - 64. (in Chinese))
- [12] 刘 强, 周瑞忠, 刘宇航. 基于 HHT 变换的结构地震响应与能量计算分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(6): 780 - 785. (LIU Qiang, ZHOU Rui-zhong, LIU Yu-hang. Computation and analysis of seismic response and energy based on Hilber-Huang transform[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(6): 780 - 785. (in Chinese))
- [13] 周德培, 张建经, 汤 涌. 汶川地震中道路边坡工程震害分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 565 - 576. (ZHOU De-pei, ZHANG Jian-jing, TANG Yong. Seismic Damage analysis of road slopes in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 565 - 576. (in Chinese))

## 第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会（第 1 号通知）

“第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会”由中国力学学会岩土力学专业委员会主办, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国地震局兰州地震研究所、兰州大学、兰州交通大学、兰州理工大学、西北民族大学等单位共同承办, 将于 2016 年 8 月 12 日~18 日在甘肃兰州召开。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃撰稿、参加会议。

**主办单位:** 中国力学学会岩土力学专业委员会。

**承办单位:** 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所; 冻土工程国家重点实验室; 中国地震局兰州地震研究所; 黄土地震工程重点实验室; 兰州大学; 中铁西北科学研究院有限公司; 青海省交通科学研究院。

**会议专题:** 岩土力学数值分析与解析新方法。

**会议的主题:** 本次会议主题包括: ①岩土本构模型与参数研究; ②岩土工程重大工程实例; ③岩土试验与测试技术; ④环境岩土工程; ⑤土动力学与土工抗震; ⑥特殊土的力学特性

与工程问题; ⑦寒旱区重大工程问题。

**会议论文与出版:** 第十二届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会会议论文征稿截止日为 2016 年 1 月 31 日。2016 年 4 月 30 日通知审稿专家修改意见和退稿意见; 2016 年 5 月 31 日前通知录用结果等事宜。论文格式与要求见《岩土力学》征稿启事。投稿范例模板请登录 “<http://ytlx.whrsm.ac.cn/CN/column/column108.shtml>” 下载。所有投稿稿件请按要求排好版后发至会议秘书处, 邮箱: [guoyuli@lzb.ac.cn](mailto:guoyuli@lzb.ac.cn) 或 [27178345@qq.com](mailto:27178345@qq.com), 投稿时麻烦注明“第十二届全国岩土力学研讨会”。经严格审稿后, 挑选部分优秀论文推荐到《岩土力学》、《冰川冻土》、《地震工程学报》、《防灾减灾工程学报》期刊上发表, 其余将以增刊或会议论文集形式出版。

**秘书处地址:** 甘肃省兰州市东岗西路 320 号, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 邮编: 730000。牛富俊 13893627904; E-mail: [niufujun@lzb.ac.cn](mailto:niufujun@lzb.ac.cn); 李国玉 13893691316; E-mail: [guoyuli@lzb.ac.cn](mailto:guoyuli@lzb.ac.cn); QQ: 27178345。

(中国力学学会岩土力学专业委员会 供稿)