

文章编号:1009-3087(2013)03-0018-09

岩质高陡边坡地震动力响应共性和差异性

杨长卫¹,高洪波²,张建经¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;2. 信阳师范学院 土木工程学院,河南 信阳 464000)

摘 要:以国道 G213 左侧两处典型的单面、双面岩质高陡边坡为原型,采用新型离散元计算方法 CDEM,对高烈度地震作用下单面、双面高陡边坡上的滑体由变形累计到破坏滑动的全过程进行了模拟,并结合振动台试验结果,对单面、双面高陡岩质边坡的地震滑坡响应进行了研究。研究表明:单面、双面高陡边坡地震动力响应存在一定的共性和差异性。两者发生滑塌破坏的过程基本一致,即在地震力和重力作用下,滑体顶部先出现拉应力集中,造成滑体沿滑体结构面后缘产生变形,进而造成该处出现拉伸、剪切破坏点,之后随着地震动的持续,滑体结构面上的剪切破坏点逐渐向滑体中前部的锁固段扩展,同时伴随着滑体表面拉伸破坏点的增加,最终造成锁固段发生渐进性破坏,滑体从剪出口滑出形成滑坡。而两者在坡面、坡体加速度的高程放大效应、坡面加速度的傅里叶谱、反应谱等动力响应方面存在差异,说明了坡体形态、坡面角度对上述动力响应具有显著的影响。

关键词:高陡边坡;地震;动力响应;CDEM;滑坡

中图分类号:TU45

文献标志码:A

Research on the Generality and Otherness of Seismic Responses of the Steep Rock Slope

YANG Chang-wei¹,GAO Hong-bo²,ZHANG Jian-jing¹

(1. School of Civil Eng., Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Eng., Xinyang Normal Univ., Xinyang 464000, China)

Abstract: A high steep hill with two-side slopes and a high steep hill with one-side slope near National Road 213 were used as a prototype. A full process from initial deformation to sliding of the slope during ground shaking was simulated by a new discrete element method (CDEM). The results showed that there are some commonalities and differences about the dynamic responses between the slopes with two-side and one-side. The stress concentration phenomenon appears at the top of the sliding mass firstly, and then some tension failure points and some shear failure points appear there, which expands toward the toe of the sliding mass from the top of that along the structural plane. The number of tension failure points gradually increases. At last, the toe of the sliding mass breaks, and then the sliding mass shears out from the toe, which results in the landslide. There are some differences in the accelerations on the slope and in the slope, as well as the Fourier spectrums of accelerations and the responses of the accelerations on the slope, which fully verifies that there are some remarkable effects of the slope angle and the slope structural kinds on those dynamic responses.

Key words: high steep slope; earthquake; dynamic responses; CDEM; landslide

岩质高陡边坡的地震稳定性问题一直是地质灾害研究的热点问题,特别是在“5·12”汶川地震以后,逐渐成为专家、学者研究的焦点。在岩质高陡边

坡地震响应研究方面,目前的研究成果主要集中于单一斜坡的震裂变形规律^[1-6]、坡面上和坡体内加速度的放大效应及分布规律^[2-8]等方面,而专门针对不同类型斜坡体地震动力响应异同点的研究则较少^[9]。同时,汶川地震震害调查结果显示斜坡结构类型对地震滑坡的震害分布、滑塌规模等均具有较大的影响^[10]。为此,作者将不考虑岩土体的性质、坡体形态等因素,将自然界中存在的斜坡类型概化为单面坡和双面坡,选取“5.12”汶川地震中典型的灾害点,利用振动台试验的相关资料,开展数值模拟,进而从一般规律上认识地震过程中岩质高陡边

收稿日期:2012-05-07

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(41030742);2012年西南交通大学优秀博士学位论文培育项目专项资金资助项目;河南省科技发展计划资助项目(122300410308);国防基础科研计划资助项目(A0220110003)

作者简介:杨长卫(1987—),男,博士生。研究方向:岩土力学。E-mail:1209732335@qq.com

坡的动力响应。

1 岩质高陡边坡的振动台试验模型和数值模型

为了研究岩质高陡边坡的地震稳定性,振动台试验以国道 G213 左侧两处典型的滑坡灾害点为原型,按几何相似比为 1:600 对其进行几何相似,得到了振动台试验模型,分别见图 1 和 2。其中,双面高陡边坡模型高 1 810 mm,宽 3 500 mm,包含陡坡地形和缓坡地形,且陡坡地形的坡度为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$,缓坡地形的坡度为 $42^{\circ} \sim 50^{\circ}$,同时依据现场调查结果将坡体表面的土层和风化层概化为坡顶、坡腰以及坡脚 3 个位置的坡积体。单面高陡边坡模型高 1 807 mm,宽 3 500 mm,坡度为 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$,坡脚处河谷宽 173 mm,河床略有倾斜,河谷右岸斜坡的坡度为 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,边坡顶部分布着严重风化层。



图 1 双面高陡边坡的振动台试验模型

Fig.1 Shaking table test model of the high steep hill with two-side slopes



图 2 单面高陡边坡的振动台试验模型

Fig.2 Shaking table test model of the high steep hill with one-side slope

为了能够深入研究岩质高陡边坡的地震响应,依据振动台试验模型的具体几何尺寸建立了数值模型,并在模型内部以及表面设置了大量监测点,用以监测地震作用下滑床和滑体的加速度、应力以及应变等动力响应的时程变化,数值模型及测点布置见图 3~4。

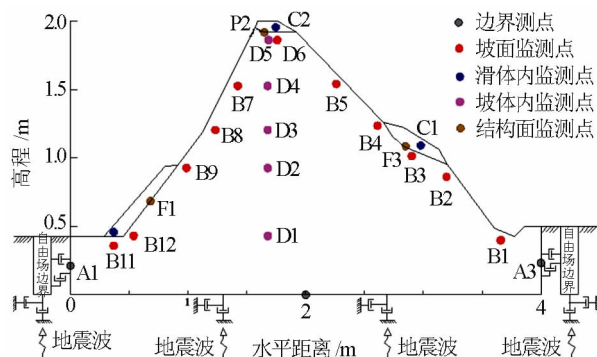


图 3 双面高陡边坡的数值分析模型及测点分布图

Fig.3 Distribution of the monitoring points and numerical of the high steep hill with two-side slopes

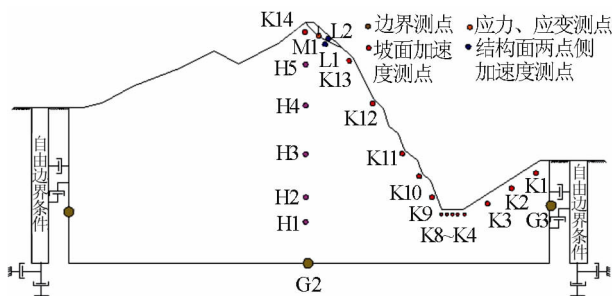


图 4 单面高陡边坡的数值分析模型及测点分布图

Fig.4 Distribution of the monitoring points and simulation model numerical simulation model of the high steep hill with one-side slope

2 CDEM 数值模拟

近年来,一种能够较好用于地质灾害成灾机理分析的新型计算方法——CDEM 已发展起来。该方法将有限元和离散元进行了耦合,在块体内部进行有限元计算,在块体边界进行离散元计算,能够很好地解决有限元、有限差分法以及传统离散元软件存在的局限性^[10]。因此,采用 CDEM 对地震作用下边坡节理化岩体的渐进破坏和失稳后的运动过程进行数值模拟。

2.1 数值本构模型及材料参数的确定

振动台试验所采用的相似材料主要由石英砂、石膏、黏土以及水以不同的比例进行配制(见表 1),且相似材料的容重相似比为 1:1,应力相似比为 1:6.35,内摩擦角、泊松比的相似比均为 1:1。本次数值模拟采用与上述相似材料相同的岩土体力学参数,其中不同位置处的滑体结构面的相关参数可通过 CDEM 中的相关公式进行求解^[10],具体的滑床、滑体、结构面处材料的物理力学参数和本构模型见表 2。

2.2 数值模型的边界条件及地震动输入

在对斜坡体进行动力数值模拟时,合理施加人工边界和确定合理的输入地震波是 2 项至关重要的工作。为了消除地震波在边界处的反射,在模型底部和两侧分别施加了吸收边界和自由场边界;由于计算结果需要和振动台试验结果进行对比,因此,选取与振动台试验相同的输入地震波,即汶川卧龙台站实测地震波的压缩波,时间压缩比为 1:4,水平、竖向峰值地震加速度分别为 957 和 857 cm/s²,持时 40 s,水平、竖向加

速度时程曲线见图 5 和 6。

表 1 各种配比材料的百分比清单

Tab. 1 List of the percentage of the matching material

%			
	河砂	黏土	石英砂
滑体	33.60	35.70	18.40
	河砂	石膏	黏土
滑床	60.40	16.10	16.10
			水
			7.25

表 2 滑体、滑床、结构面的物理力学特性参数

Tab. 2 Physics parameters of the sliding mass, the sliding bed and the sliding surface

振动台 试验模型	模型名称	本构模型	重度/ (kN · m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	弹性模量/ MPa	泊松比
单面高陡边坡、 双面高陡边坡	滑床 滑体	摩尔-库伦	22	15.6	37.9	75	0.25
			21	8.3	28.8	10	0.35
振动台 试验模型	结构面 位置	本构 模型	法向刚度/ MPa	切向刚度/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ kPa	黏聚力/ kPa
单面高陡边坡	滑体内		600	300	32	4.33	8.1
	滑床-滑体(坡脚)		4 500	2 300	32	1.21	2.3
	滑床-滑体(坡腰)	脆性断	4 500	2 300	32	1.05	2.3
	滑床-滑体(坡顶)	裂模型	6 200	6 200	36	3.86	7.2
双面高陡边坡	滑床-滑体(坡顶)		4 500	2 300	32	1.05	2.3

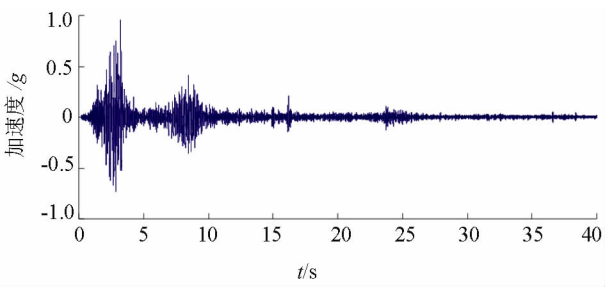


图 5 水平加速度时程曲线

高陡边坡振动台试验模型中选取了 B6、B8 和单面高陡边坡振动台试验模型中的 K8、K11 作为对比点,将数值计算结果与振动台试验结果进行对比,如表 3 所示。

综合分析表 3 可知,水平、竖向加速度的最大误差均小于 10%,其中水平加速度的最小误差可达到 -1.19%,竖向加速度的最小误差可达到 2.28%。因此,数值模拟结果和振动台试验结果基本一致,充分说明了作者数值模型是正确的,计算结果是可信的。

2.3.2 坡面、坡体加速度的高程放大效应分析

为了研究地震作用下单面、双面高陡边坡中加速度沿坡面、坡体高程的传播规律,在双面高陡边坡的缓坡地形上设置了 B1 ~ B6、陡坡地形上设置了 B6 ~ B10、坡体内设置了 D1 ~ D5 测点,同时在单面高陡边坡的坡面上设置了 K14 ~ K8、坡体内设置 C1 ~ C5 和 K14 测点,具体结果详见表 4 和 5。

表 4 和 5 中,加速度的放大系数 = 加速度峰值的计算结果 / 输入波的加速度峰值。

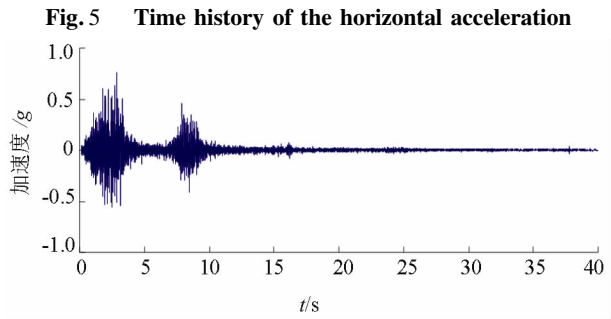


图 6 竖向加速度时程曲线

2.3 数值模拟结果及分析

2.3.1 数值计算结果的振动台试验验证

为了验证数值计算结果的正确性,分别在双面

Fig. 6 Time history of the vertical acceleration

Fig. 6 Time history of the vertical acceleration

表3 振动台试验与数值模拟两者峰值加速度结果的对比

Tab.3 Comparison of the results of the PGA between the shaking table test and the numerical simulation

监测 点号	CDEM 计算结果/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		振动台试验结果/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		误差/%	
	水平加速度	竖向加速度	水平加速度	竖向加速度	水平加速度	竖向加速度
B6	27.5	32.5	27.026	30.504	1.75	6.54
B8	22.1	31.2	24.545	30.504	9.96	2.28
K8	16.6	13.1	16.8	12.8	-1.19	2.34
K14	19.3	15.6	20.5	14.3	-6.21	-8.3

注:误差=(CDEM 计算结果 - 振动台试验结果)/振动台试验结果。

表4 双面、单面高陡边坡的水平峰值加速度放大系数

Tab.4 Amplification factors of the horizontal PGA of the hill with two-side and one-side slopes

距模型底 边高度/m	双面高陡边坡			距模型底 边高度/m	单面高陡边坡	
	陡坡地形	缓坡地形	坡体内		坡面上	坡体内
1.75	2.87	2.87	2.89	1.78	2.02	2.02
1.35	2.31	2.59	2.47	1.53	2.35	2.37
1.05	2.31	2.42	2.26	1.21	2.99	2.26
0.75	2.26	2.28	1.98	0.84	2.59	2.06
0.25	2.60	2.01	1.73	0.32	1.73	1.29
均值	2.47	2.43	2.27	均值	2.34	1.99

表5 双面、单面高陡边坡的竖向峰值加速度放大系数

Tab.5 Amplification factors of the vertical PGA of the hill with two-side and one-side slopes

距模型底 边高度/m	双面高陡边坡			距模型底 边高度/m	单面高陡边坡	
	陡坡地形	缓坡地形	坡体内		坡面上	坡体内
1.75	3.81	3.81	3.78	1.78	1.82	1.82
1.35	3.77	3.42	3.01	1.53	3.36	2.70
1.05	3.65	2.5	2.35	1.21	4.38	3.48
0.75	3.40	2.24	2.05	0.84	3.64	3.22
0.25	3.07	1.90	1.82	0.32	1.53	1.50
均值	3.54	2.77	2.60	均值	2.95	2.54

综合分析表4~5、图7~8可知,以输入波为基准,在双面高陡边坡模型中,陡坡地形上水平加速度的放大系数在2.5~3之间(均值2.47),竖向加速度的放大系数在3.0~4.0之间(均值3.54);缓坡地形上水平加速度的放大系数在2.0~3.0之间(均值2.43),竖向加速度的放大系数在1.9~4.0之间(均值2.77);坡体内水平加速度放大系数在1.7~3.0之间(均值2.27),竖向加速度放大系数在1.8~3.8之间(均值2.60)。在单面高陡边坡模型中,坡面上水平加速度的放大系数在1.7~3.0之间(均值2.34),竖向加速度的放大系数在1.5~4.5之间(均值2.95);坡体内水平加速度放大系数在1.2~2.4之间(均值1.99),竖向加速度放大系数在1.5~3.5之间(均值2.54)。因此,不论是单面高陡边

坡还是双面高陡边坡,不同位置峰值加速度沿坡高均具有不同程度的放大,表现为双面高陡边坡对加速度的放大效应>单面高陡边坡对加速度的放大效应,这就充分解释了“5·12”汶川地震中双面坡或孤立斜坡的破坏程度大于单面坡这一震害现象^[9];竖向峰值加速度的放大效应大于水平峰值加速度的放大效应,这与殷跃平、许强以及 Davis^[11-13]等的研究成果基本一致,出现上述现象可能是由于竖向输入地震波的卓越频率为9.3 Hz,水平输入地震波的卓越频带在20~60 Hz,而单面坡的自振频率为6.1 Hz,双面坡的自振频率为6.41 Hz,两者均与竖向输入地震波的卓越频率比较接近,可能诱发坡体共振,进而造成了竖向加速度的放大效应大于水平加速度的放大效应;坡面处峰值加速度的放大效应>坡体

内峰值加速度的放大效应;陡坡地形峰值加速度的放大效应 > 缓坡地形峰值加速度的放大效应,这就很好地解释了汶川地震滑坡灾害分布所具有的方向性即陡坡面的震害较缓坡面更为严重^[9]。

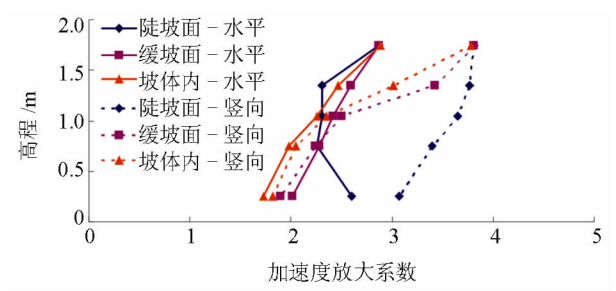


图 7 双面高陡边坡的加速度放大效应分布图
Fig. 7 Distribution of the amplification of PGAs of the hill with two-side slopes

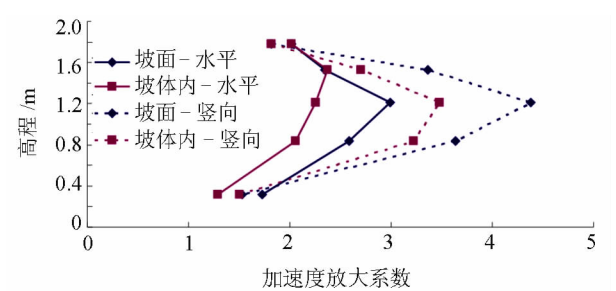


图 8 单面高陡边坡加速度放大效应分布图
Fig. 8 Distribution of the amplification of PGAs of the hill with one-side slopes

2.3.3 坡面上加速度的傅里叶谱分析

为了研究地震作用下单面、双面高陡边坡中坡面加速度的傅里叶谱沿高程的分布规律,在双面高陡边坡的缓坡地形和陡坡地形上分别设置了 B9、B11、B13 测点和 B17、B15、B13 测点,同时在单面高陡边坡的坡面上设置了 K2、K4、K7 测点,具体结果见图 9。值得注意的是由于单面高陡边坡和双面高陡边坡的水平、竖向加速度反应谱沿坡高的变化规律一致,因此,仅列举单面高陡边坡的 K2、K4、K7 点的水平加速度的计算结果进行说明。

综合分析图 9 可知,不论是单面高陡边坡还是双面高陡边坡,水平、竖向加速度的傅里叶谱沿坡面高程均具有低频成分放大的变化规律。以单面高陡边坡坡面上的水平、竖向加速度为例来加以说明。图 9 中显示单面高陡边坡的坡脚、坡腰和坡顶 2 处水平加速度的卓越频带均为 3 ~ 10 Hz,其中 K2、K4、K7 点分别显示了坡脚、坡腰和坡顶处水平加速度卓越频带的谱值分别为 2.583、3.215、4.296,竖向加速度卓越频带的谱值为 1.32、2.01、2.92。因此,单面高陡边坡坡面上水平、竖向加速度

的傅里叶谱具有低频成分放大的规律。出现上述现象可能是由于土体自身的材料阻尼吸收了一部分地震波的能量,对高频段的地震波起到了滤波作用,对接近土体自振周期的频段起到了放大作用。

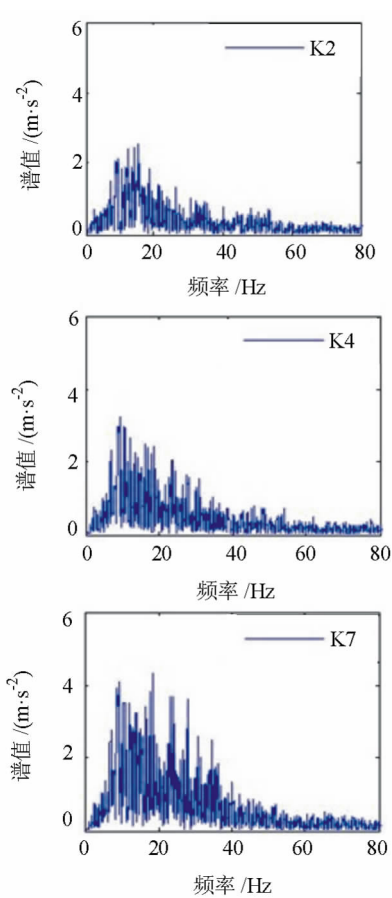


图 9 水平、竖向加速度的傅里叶谱分布图
Fig. 9 Distribution of the Fourier spectra of the horizontal accelerations

同时,为了更加深入地研究加速度傅里叶谱沿坡面高程所具有的低频带放大这一变化规律,提取了单面、双面高陡边坡坡面上加速度傅里叶谱中低频带的峰值,绘制了低频带中加速度傅里叶谱峰值的高程放大系数,见图 10。

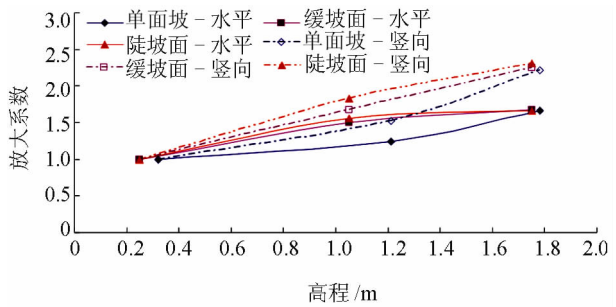


图 10 低频带傅里叶谱峰值的高程放大系数
Fig. 10 Amplification of the Fourier spectrum in low frequency band

图 10 中显示了不论是单面高陡边坡还是双面高陡边坡,不同位置加速度傅里叶谱的峰值沿高程均具有不同程度的放大,表现为双面高陡边坡对加速度傅里叶谱的放大效应>单面高陡边坡对加速度傅里叶谱的放大效应,竖向加速度傅里叶谱峰值的放大效应>水平加速度傅里叶谱峰放值的大效应;陡坡面(坡面角度 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$)加速度傅里叶谱峰值的放大效应>缓坡面(坡面角度 $42^{\circ} \sim 50^{\circ}$)加速度傅里叶谱峰值的放大效应。综合分析图 9 和 10 可知,坡体形态、坡面角度对低频成分放大的变化规律具有显著影响。

2.3.4 坡面上加速度的反应谱分析

为了研究地震作用下单面、双面高陡边坡坡面加速度反应谱沿高程的分布规律,在单面高陡边坡的坡底、坡腰和坡顶位置分别设置了 K2、K4、K7 测点,在双面高陡边坡的缓坡地形上设置了 B9、B11、B13 测点,在陡坡地形上设置了 B17、B15、B13 测点,具体计算结果见图 11。值得注意的是由于单面、双面高陡边坡计算结果所揭示的加速度反应谱的变化规律除了各自的放大性存在差异外,其它的响应规律基本一致,因此仅列举单面高陡边坡上加速度反应谱的结果进行说明。

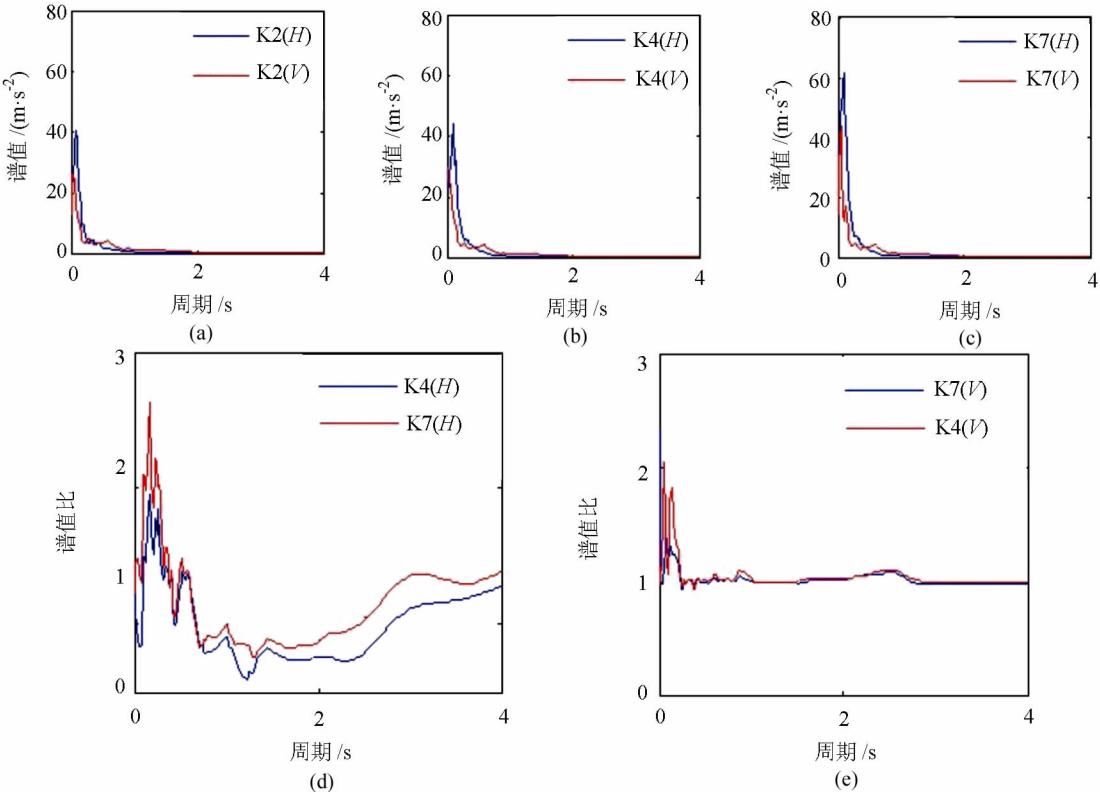


图 11 单面高陡边坡坡面加速度反应谱

Fig. 11 Distribution of the accelerations of the hill with one-side slopes

综合分析图 11 可知,单面、双面高陡边坡坡面加速度反应谱存在较大的差异。首先,不论是水平加速度还是竖向加速度,单面高陡边坡坡面加速度反应谱沿高程均呈单峰值,双面高陡边坡坡面加速度沿高程是一个由单峰值向双峰值逐渐蜕变的过程,即在坡脚处的加速度反应谱呈单峰值,坡腰处的加速度反应谱略显双峰值,坡顶处的加速度反应谱则具有明显的双峰值现象,出现上述现象可能是由于双面高陡边坡在地震作用下沿高程加速度逐渐放大,地震动更加强烈,出现了“鞭梢效应”,因此产生了双峰值现象。其次,单面、双面高陡边坡水平加速度反应谱谱值放大系数的最大值均出现在周期 $T_H = 0.16$ s 时,出

现上述现象可能是由于 $T_H = 0.16$ s 和单面高陡边坡的自振周期 $T = 0.165$ s、双面高陡边坡的自振周期 $T = 0.156$ s 比较接近,产生了共振,造成两者在坡面处出现剧烈的地震动响应,而竖向加速度反应谱谱值放大系数最大值出现的周期 T_H 则存在一定的差异。最后,单面高陡边坡水平、竖向加速度反应谱谱值的放大系数在 $0.6 \sim 2.5$ 和 $1.0 \sim 2.1$,缓坡面水平、竖向加速度反应谱谱值的放大系数分别在 $1.0 \sim 3.21$ 和 $1.0 \sim 6.1$,陡坡面水平、竖向加速度反应谱的放大系数分别在 $1.0 \sim 3.32$ 和 $1.0 \sim 3.7$ 。因此,不论是单面高陡边坡还是双面高陡边坡,水平、竖向加速度反应谱的谱值沿高程均有所放大,表

现为双面高陡边坡对加速度反应谱的高程放大效应 > 单面高陡边坡对加速度反应谱的高程放大效应, 竖向加速度反应谱峰值的放大效应 > 水平加速度反应谱峰值的放大效应; 陡坡面加速度反应谱峰值的放大效应 > 缓坡面加速度反应谱峰值的放大效应。因此, 坡体形态、坡面角度对坡面上加速度反应谱的高程变化规律具有显著的影响。

2.3.5 滑体内部土颗粒的动力学特性

为了研究动力荷载作用下滑体内部土颗粒的动力学特性, 针对滑体部位的相似材料开展动三轴试验, 进而得出不同地震烈度下滑体内部土颗粒的抗剪强度, 具体结果见图 12、表 6。

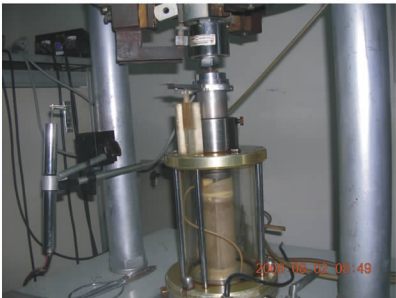


图 12 饱和试样的动三轴试验

Fig. 12 Dynamic triaxial test of the saturated specimen

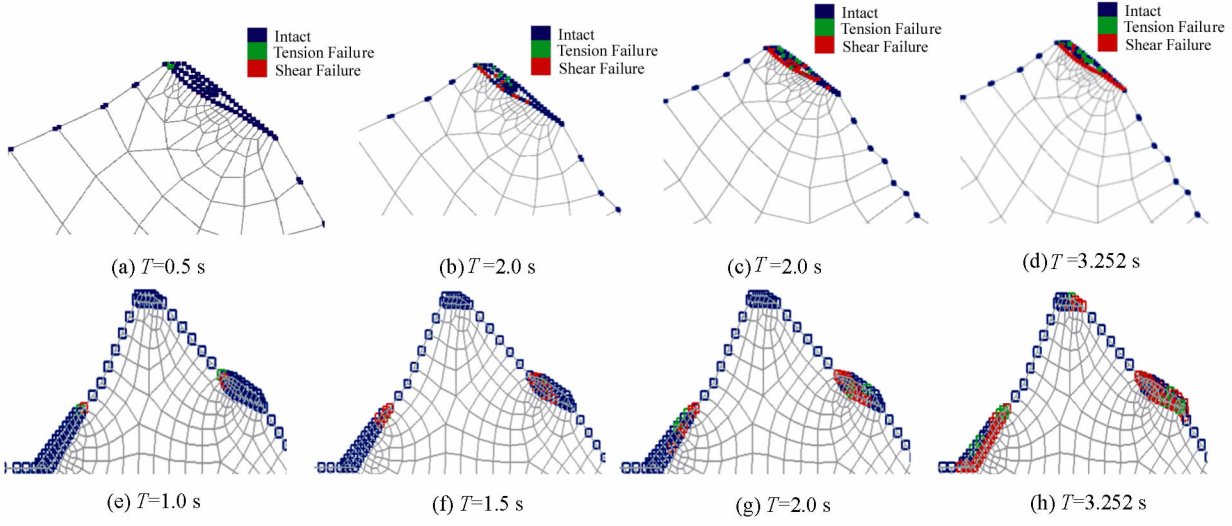


图 13 单面、双面高陡边坡剪切、拉伸破坏点分布图

Fig. 13 Distribution of the shear failure points and the tensile failure points of the hill with one-side and two-side slopes

综合分析图 13 可知, 单面、双面高陡边坡滑体由变形累计向破坏滑动的全过程基本一致, 略有差异。第一, 两者的差异性: 在 $T = 3.252\text{ s}$ 时, 单面高陡边坡坡顶处滑体结构面基本上完全贯通, 而双面高陡边坡坡腰处滑体已经发生滑塌, 充分说明了在输入地震波、滑体结构面参数等外部条件相同的情况下, 双面高陡边坡的地震响应较单面高陡边坡更

表 6 滑体材料的动强度试验成果表

Tab. 6 Results of dynamic shear strengthen of the sliding material

振动周次 N	对应等级	动剪应力 $\tau_d : \sigma_{3e}$		
		100 kPa	200 kPa	400 kPa
12	7.0	0.407	0.395	0.373
20	7.5	0.382	0.369	0.335
30	8.0	0.362	0.350	0.322

综合分析表 6 可知, 在相同固结围压下, 随振动周次 N 的增加即对应地震震级的增加, 动抗剪强度 τ_d 逐渐减小; 在同一振动周次下, 随围压增加, 动抗剪强度 τ_d 增加的幅度逐渐减小。因此, 在数值计算中滑床内部以及滑体结构面的抗剪强度将会随着地震动加速度的增大而逐渐降低。

2.3.6 滑动带变形累计效应分析

CDEM 经计算后得到了地震过程中不同时刻单面、双面高陡边坡模型内各个结构面的剪应变和拉应变的分布情况, 见图 13。由于在地震波施加 $T = 3.252\text{ s}$ 之后单面、双面高陡边坡的滑体结构面均已经发生贯通性破坏, 因此分别选取 $T = 3.252\text{ s}$ 之前坡体的动力响应进行分析。

为强烈, 震害更为严重, 上述现象与汶川地震震害的调查结果基本一致^[9]。第二, 两者的共性: 首先, 在地震动初期, 滑体顶部出现了少量拉伸、剪切破坏点; 随着输入地震动的增加, 滑体结构面的剪切破坏点逐渐向下发展, 形成了大量不连续的拉伸、剪切破坏点; 随着输入地震动的继续增加, 滑体结构面上的拉伸、剪切破坏点逐渐连通, 形成连续剪切破坏滑裂

面,并逐渐向滑体前缘的锁固段发展;最后,输入地震波的加速度达到峰值,滑体结构面的剪切破坏点迅速扩展,形成贯通坡脚处整个滑体结构面的连续剪切破裂面。上述破坏现象不仅与振动台的试验现象一致,而且与“5·12”汶川地震中绝大多数滑坡发生时间的调查结果一致^[9]。出现上述现象可能是由于以下几个原因:

1)在重力和地震力作用初期,滑体顶部出现了拉应力集中,造成滑体沿滑体结构面后缘产生变形,进而引起该处出现拉伸、剪切破坏;

2)随着地震动加速度的增加,滑体与滑床间的加速度差逐渐增大,滑体的下滑力也随之增加;

3)地震动峰值加速度沿坡面具有一定的放大性,在坡腰(双面坡)、坡顶(单面坡)处具有较大的加速度,产生了较大的惯性力,进而诱发坡腰(双面坡)、坡顶(单面坡)处滑体出现滑塌;

4)在地震动作用下,滑床内部以及滑体结构面的抗剪强度将会随着地震动加速度的增大而逐渐降低。

综上所述,高陡边坡发生滑坡是一个均衡的、渐进的过程。在重力和地震力作用下,首先在滑体顶部出现拉应力集中,造成滑体沿滑体结构面后缘产生变形,进而引起该处出现拉伸、剪切破坏点,之后随着地震力的持续,滑体结构面上的剪切破坏点逐渐向滑体前缘的锁固段发展,同时伴随着滑体表面拉伸破坏点的增多,最终造成锁固段发生渐进性破坏,破裂面贯通形成滑动带,滑体从剪出口滑出形成滑坡。

3 结 论

将边坡概化为单面、双面高陡边坡,并以国道G213左侧的2处典型的滑坡灾害点为原型,利用新型离散元计算方法——CDEM,结合振动台试验的相关资料,从一般规律上开展地震过程中岩质高陡边坡动力响应的研究,得出以下结论:

1)在输入地震波、滑体结构面参数等外部条件相同的情况下,双面高陡边坡的地震动响应较单面高陡边坡更为强烈,震害也更为严重。

2)高陡边坡发生滑坡是一个均衡的、渐进的过程。在重力和地震力作用下,首先在滑体顶部出现拉应力集中,造成滑体沿滑体结构面后缘产生变形,进而引起该处出现拉伸、剪切破坏点,之后随着地震力的持续,滑体结构面上的剪切破坏点逐渐向滑体前缘的锁固段发展,同时伴随着滑体表面拉伸破坏

点的增多,最终造成锁固段发生渐进性破坏,破裂面贯通形成滑动带,滑体从剪出口滑出形成滑坡。

3)边坡滑塌发生的时间与地震动峰值加速度到达的时间同步或稍微有所滞后。

4)单面、双面高陡边坡坡面加速度的傅里叶谱沿高程均具有低频成分放大的变化规律,且该变化规律受到坡体形态和坡面角度的影响。

5)不论是水平加速度还是竖向加速度,单面高陡边坡坡面加速度反应谱沿高程均呈单峰值,双面高陡边坡坡面加速度沿高程是一个由单峰值向双峰值逐渐蜕变的过程。

6)单、双面高陡边坡在坡面、坡体加速度的高程放大效应上存在一定的差异,同时在坡面加速度的傅里叶谱及反应谱等动力响应存在较大差异,充分说明坡体形态、坡面角度对上述动力响应具有显著的影响。

参考文献:

- [1] Ghose S, Mellors R J, Korjenkov A M, et al. The Ms = 7.3 1992 Suusamy, Kyrgyzstan earthquake in the Tien Shan; Aftershock focal mechanisms and surface deformation[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 23-38.
- [2] Qi Shengwen, Wu Faquan, Liu Chunling. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2792-2796. [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.]
- [3] 王存玉, 王思敬. 边坡模型振动实验研究——岩体工程地质力学问题(七)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 65-74.
- [4] Goodman R E, Seed H B. Earthquake-induced displacements in sand embankment[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(SM2): 125-146.
- [5] Richards R, Elms D G. Seismic behavior of gravity retaining walls[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(4): 449-464.
- [6] Lin J S, Whitman R V. Earthquake induced displacements of sliding blocks[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1986, 112(1): 44-59.

- [7] Xu Xiangning. Geological analysis and geomechanics analog study of mountain deformation-failure mechanism in high earthquake-intensity area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. [许向宁. 高地震烈度区山体变形破裂机制地质分析与地质力学模拟研究[D]成都: 成都理工大学, 2006.]
- [8] Zhang Jian, Yang Changwei, Zhao J X, et al. Empirical models for predicting lateral spreading with considering the effect of region seismicity[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 11(3): 121 – 131.
- [9] Xu Qiang, Li Weile. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42 (Supp 1): 7 – 14. [许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42 (增1): 7 – 14.]
- [10] Li Shihai, Liu Tianping, Liu Xiaoyu. Analysis method for landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 1 – 16. [李世海, 刘天萍, 刘晓宇, 等. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 1 – 16.]
- [11] Cui Fangpeng, Xu Qiang, Tan Rujiao, et al. Numerical simulation of collapsing and sliding response of slope triggered by seismic dynamic action[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(3): 445 – 450. [崔芳鹏, 许强, 谭儒娇, 等. 地震动力作用触发的斜坡崩滑效应模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 445 – 450.]
- [12] Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Yin Yueping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of p and s seismic waves—taking tangjiashan landslide in beichuan county for example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 319 – 327. [崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319 – 327.]
- [13] Davis L L, West L R. Observed effects of topography on ground motion[J]. Bulletin of The Seismological Society of America, 1973, 63(1): 283 – 298.

(编辑 陈晓红)