

DOI: 10.11779/CJGE201504015

含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡动力响应差异性研究

范 刚, 张建经, 付 晓

(西南交通大学土木学院岩土工程系, 四川 成都 610031)

摘 要: 设计并制作了两个同尺寸的含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡, 并进行了大型振动台试验, 对含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡的动力响应差异性进行了分析, 研究结果表明: 顺层边坡坡体内部加速度放大系数整体上小于反倾边坡; 在坡体中上部(相对高度大于0.4), 顺层边坡坡面加速度放大系数大于反倾边坡, 在坡体下部(相对高度小于等于0.4), 顺层边坡坡面加速度放大系数与反倾边坡近似相等; 顺层边坡和反倾边坡坡面位移随输入地震动强度增大而大幅度增加, 顺层边坡坡面位移大于反倾边坡, 且随着输入地震波幅值的增加, 顺层边坡和反倾边坡坡顶位移之间的差值增大; 反倾边坡较顺层边坡具有更高的地震稳定性; 顺层边坡破坏形式主要表现为坡体后缘的垂直张拉裂隙、岩层沿泥化夹层的顺层滑动以及坡顶岩块崩落, 而反倾边坡的破坏形式主要表现为坡面水平向和垂直向裂隙交错、泥化夹层挤出以及坡顶被震碎。

关键词: 泥化夹层; 顺层; 反倾; 大型振动台; 动力响应

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)04-0692-08

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。

Dynamic response differences between bedding and count-tilt rock slopes with siltized intercalation

FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Two models with the same dimension, bedding and count-tilt rock slopes with siltized intercalation are designed, and large-scale shaking table tests are performed to analyze the seismic response differences between bedding and count-tilt rock slopes with siltized intercalation. The research results show that the acceleration amplification coefficient in the bedding rock slope is smaller than that in the count-tilt rock slope. The acceleration amplification coefficient on slope face of the bedding rock slope is larger than that of the count-tilt rock slope at the middle and upper parts of slope, where the elevation height is not less than 0.4, while the acceleration amplification coefficient on slope face of the bedding rock slope is close to that of the count-tilt rock slope at the lower part of slope, where the elevation height is less than 0.4. The displacements on slope faces of both the bedding and count-tilt rock slopes increase with the increase of the amplitude of input seismic waves, but the displacement on slope face of bedding rock slope is larger than that of count-tilt rock slope, and the difference value between increases with the amplitude of input seismic waves. The seismic stability of the bedding rock slope is stronger than that of the count-tilt rock slope; the failure forms of bedding rock slope mainly include vertical tension crack at the back edge, bedding sliding at mud layer and caving rocks at slope top, while those of the count-tilt mainly include intersect of horizontal and vertical cracks, squeezed siltized intercalation and shattered slope top.

Key words: siltized intercalation; bedding rock slope; count-tilt rock slope; large-scale shaking table; seismic response

0 引 言

2008年汶川地震中发现了大量岩质边坡失稳破坏的实例, 震后对多个破坏边坡的调查发现, 岩质边坡的失稳破坏与边坡的结构特征具有密切的关系, 顺层和反倾岩质边坡具有不同的地震动响应特性和失稳破坏模式^[1-4]。近些年, 关于顺层和反倾岩质边坡的动力特性已经有了一些研究成果, 主要集中在边坡的加

速度放大效应、位移和破坏模式研究。肖克强等^[5]应用二维离散元程序UDEC计算了地震荷载作用下边坡的位移, 并将计算结果与Newmark法计算结果及震后现场实测值进行对比, 初步分析了地震荷载作用下坡高、坡角、岩层倾角等因素对顺层岩质边坡位移的影

基金项目: 交通运输部建设科技项目(2013318800020)

收稿日期: 2014-08-07

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

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

响规律; 黄润秋等^[6]基于汶川地震震害调查资料, 提出了顺层岩质边坡在强震下变形破坏的“概念模型”, 并利用大型振动台试验对顺层和反倾岩质边坡的动力特性进行了研究; 杨国香等^[7]采用物理模型试验, 研究了强震作用下反倾层状结构岩质边坡动力响应特征及破坏过程; 余业^[8]利用离散元软件分析了反倾边坡在地震波作用下的放大效应以及坡体内应力场的变化规律。以上一些研究成果对于认识顺层和反倾岩质边坡的动力特性具有一定的指导意义, 但是, 这些研究成果均是基于简单的层状顺层或是反倾岩质边坡, 并未考虑层间可能存在的泥化夹层对边坡动力特性的影响, 目前, 关于含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡地震作用下动力特性的研究鲜见报端。

本文借助大型振动台试验方法, 制作了含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡模型各一个, 并进行了大型振动台试验, 通过分析顺层和反倾岩质边坡的动力响应特征, 进而从一般规律上认识地震过程中含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡的动力响应。

1 振动台试验概述

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, 该振动台有 6 个自由度, 台面尺寸 6 m×6 m, 最大负载 600 kN, 水平向最大位移±150 mm, 垂直向最大位移±100 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 0.1~80 Hz。试验采用 128 通道 BBM 数据采集系统, 最大引用误差≤0.5%, 信号适配间接电荷转换器以转换电压信号, 最大引用误差≤1%。试验用振动台和模型箱如图 1 所示。



图 1 振动台及模型箱

Fig. 1 Shaking table and model box

1.1 试验模型及测点布置

试验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: 砂子: 石膏: 水=1:0.2:1:0.2 的比例搅拌均匀压实制成。模型的模块间用黏结材料进行黏接, 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, 室内试验测定黏结材料的物理力学参数为密度 2.2 g/cm³, 内摩擦角 32°, 黏聚力 0.9 MPa。试验边坡模型底面尺寸为长×宽: 170 cm×128 cm, 高为 250 cm, 坡角 72°。已有的研究表明^[9-10], 因受限于试验设备性能, 本次试验边坡模型长度较短, 可能存在端部效应, 但是已有的边坡振动台试验表明^[11-13], 端部效应的存在并不影响试验结果的定性分析。试验中, 在模型与模型箱之间铺设 10 cm 厚的泡沫材料, 模拟吸波材料, 以降低模型箱对输入波的反射和折射^[14-15], 同时值得注意的是, 吸波材料与试验模型之间存在的摩擦将导致坡体内部产生不均匀的剪应变, 为了尽量降低这一影响, 试验模型中所有的传感器均布置于模型的中心线上。在每个试验模型内部均设置 6 个泥化夹层, 每个泥化夹层厚度为 3 cm, 泥化夹层倾角为 8°, 泥化夹层模拟材料由四川乐山某原型坡泥化夹层取样之后在室内重塑得到。模块及泥化夹层模拟材料的物理力学参数如表 1 所示。

根据相似理论^[16], 选取几何尺寸、质量密度和地震加速度作为控制量, 选取相似比为 20, 推导得到本试验各物理量的相似比分别为: 密度为 1, 加速度为 1, 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激光位移计。三向加速度计水平方向的灵敏度为 173.46 mV/g, 垂直方向的灵敏度 192.08 mV/g; 激光位移计的灵敏度为 500 mV/mm。加速度传感器布置在坡体内部和坡面附近, 同时在模型与底座交接面上也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 2 和图 3 中的 A1 和 A19; 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 2 和图 3 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。为了对顺层和反倾岩质进行对比分析, 顺层和反倾边坡的坡体形态、尺寸、砌筑材料及方法、泥化夹层倾角均相同。

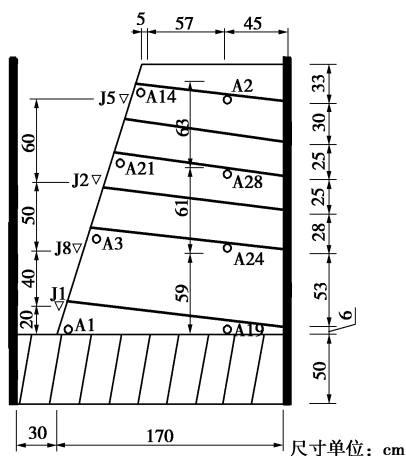


图 2 反倾边坡试验测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points in cont-tilt slope

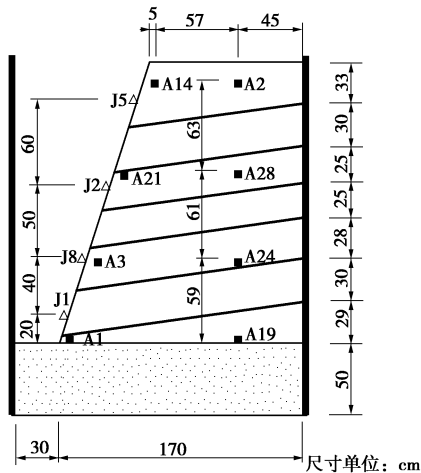


图 3 顺层边坡试验测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points in bedding slope

1.2 加载工况

本次试验共进行了顺层和反倾两个台次的振动台试验，加载方向为水平 X 向和垂直 Z 向，加载波形为汶川地震清屏波（代号 QP）和 El Centro 波（代号 EI），施加了加速度峰值分别为 $0.1g$ ， $0.21g$ ， $0.3g$ ， $0.4g$ 和 $0.6g$ 的上述两种地震波，水平方向输入的归一化后的汶川地震清屏波和 El Centro 波如下图所示。在每一幅值地震波加载前均对模型进行幅值 $0.1g$ 的白噪声扫描（图 4~7）。



图 4 反倾边坡试验模型全貌

Fig. 4 Test model of cont-tilt slope

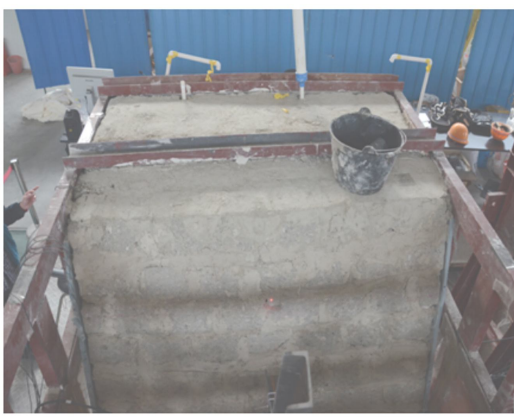


图 5 顺层边坡试验模型全貌

Fig. 5 Test model of bedding slope

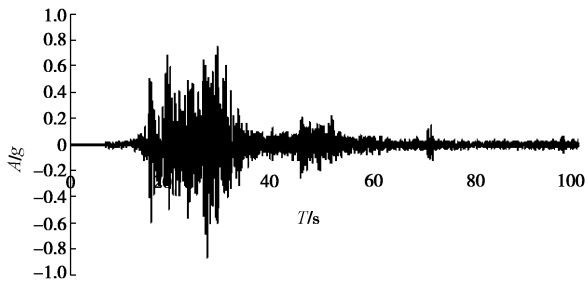


图 6 汶川地震清屏波

Fig. 6 Qingping seismic waves

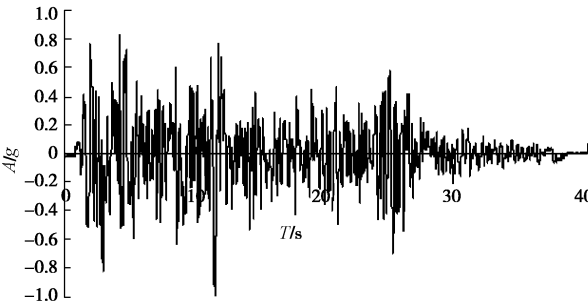


图 7 El Centro 波

Fig. 7 El Centro seismic waves

2 结果分析

2.1 边坡放大效应分析

泥化夹层倾向的不同将导致地震波在坡体内具有不同的传播路径，这必将影响边坡坡体内部和坡面的加速度放大系数，但具体影响规律还不得而知。定义加速度放大系数为各个测点的加速度监测值峰值与边坡底部测点（A1，A19 测点）加速度监测值峰值之比。本文选取输入幅值为 $0.1g$ ， $0.21g$ 和 $0.4g$ 的 El Centro 地震波作为研究工况，探究泥化夹层倾向对边坡坡体内部和坡面加速度放大系数的影响。坡体内部和坡面加速度放大系数如图 8，9 所示。

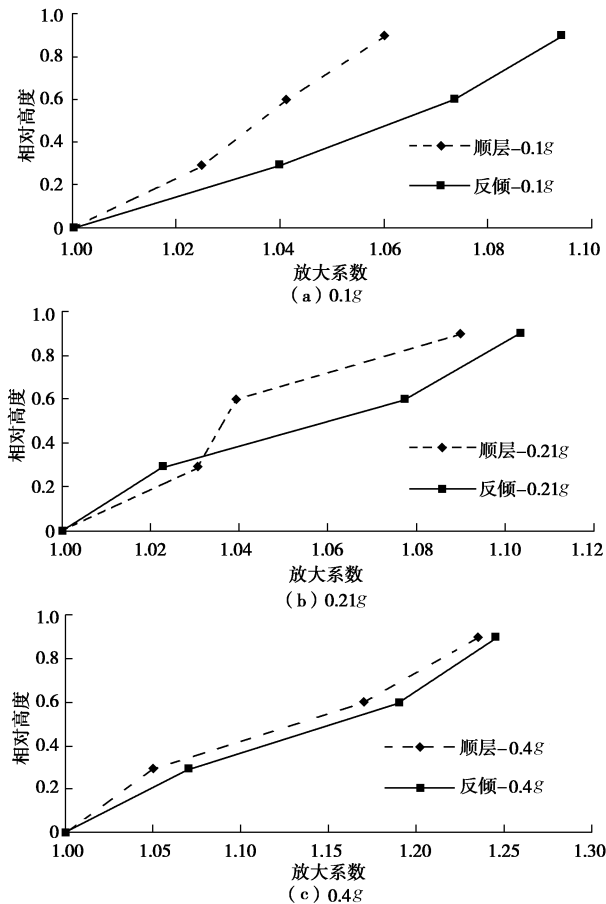


图8 坡体内部加速度放大系数

Fig. 8 Amplification coefficients of slope

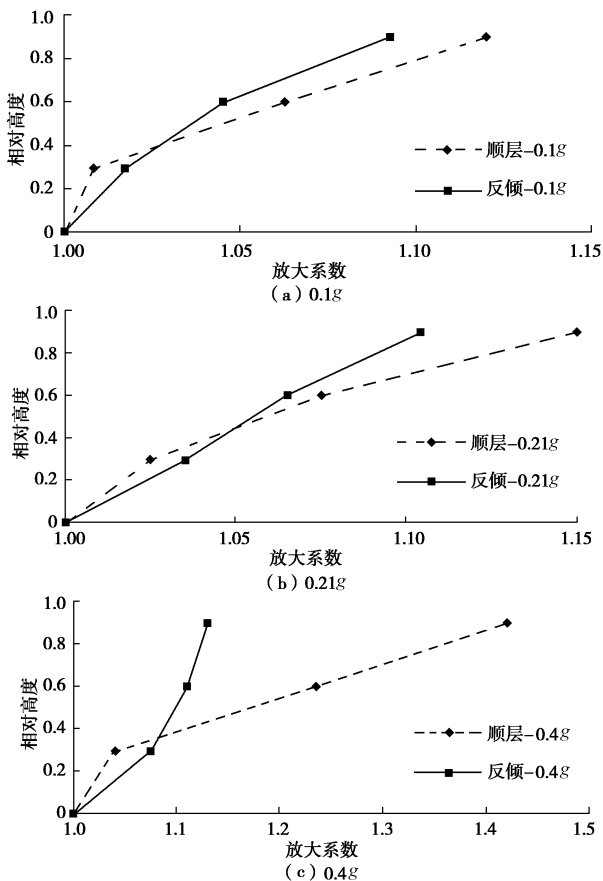


图9 坡面加速度放大系数

Fig. 9 Amplification coefficients of slope face

如图7所示,随着相对高度的增加,含泥化夹层顺层和反倾边坡坡体内部的加速度放大系数近似呈线性增加,坡体内部加速度放大系数最大值出现在坡顶,反倾边坡加速度放大系数增加幅度大于顺层边坡。同时可以发现,反倾边坡坡体内部的加速度放大系数整体上大于顺层边坡。出现这种现象的原因可能是地震波在坡体内部由下至上传播过程中,由于顺层边坡存在向坡面临空面发生滑动的趋势,在地震波作用下岩层沿泥化夹层向坡面临空面方向滑动,层间错动消耗了地震波能量,相对于顺层边坡,反倾边坡的层间错动较小,对地震波的能量耗散较小,另一方面,顺层边坡存在层间错动的趋势,导致顺层边坡层间荷载传递作用较反倾边坡弱,因此,坡体内部反倾边坡的加速度放大系数大于顺层边坡。对比两条曲线的间距可以发现,随着输入地震波幅值的增加,顺层边坡和反倾边坡坡体内部加速度放大系数之间的差距减小。

从图8中可以看出,含泥化夹层顺层和反倾边坡坡面的加速度放大系数随着相对高度的增加而增加,坡面加速度放大系数最大值出现在坡顶。以相对高度0.3为界,相对高度0.3以下,顺层边坡坡面加速度放大系数增加幅度小于反倾边坡,相对高度0.3以上,顺层边坡坡面加速度放大系数增加幅度大于反倾边坡。在坡面中上部(相对高度大于0.4),顺层边坡坡面加速度放大系数大于反倾边坡,在坡面下部(相对高度小于等于0.4),顺层边坡坡面加速度放大系数与反倾边坡近似相等,随着输入地震波幅值的增加,顺层边坡和反倾边坡坡面顶部加速度放大系数之间的差距逐渐增大。分析出现这种现象的原因可能为地震波作用下,顺层边坡中上部岩层沿泥化夹层向坡面临空面发生滑动,而反倾边坡因岩层倾向坡体内部,坡体中上部岩层向临空面的滑动幅度较小,这导致了顺层边坡坡面中上部的动力响应强于反倾边坡。与已有不含软弱夹层顺层和反倾岩质边坡的加速度放大效应研究成果对比发现^[6],含软弱夹层的顺层和反倾岩质边坡坡面和坡体内部加速度放大效应均大幅度降低。

2.2 坡面位移反应

幅值分别为0.1g, 0.21g, 0.3g和0.6g El Centro地震波作用下顺层边坡和反倾边坡坡面的位移如图10所示。

从图10可以看出,随着相对高度的增加,顺层和反倾边坡坡面的位移逐渐增大,坡顶位移最大。随着输入地震动强度的增大,顺层边坡和反倾边坡坡面的位移均大幅度增加。顺层边坡坡面位移大于反倾边坡,顺层和反倾边坡坡顶位移之间的差距随着输入地震波幅值的增加而增大。

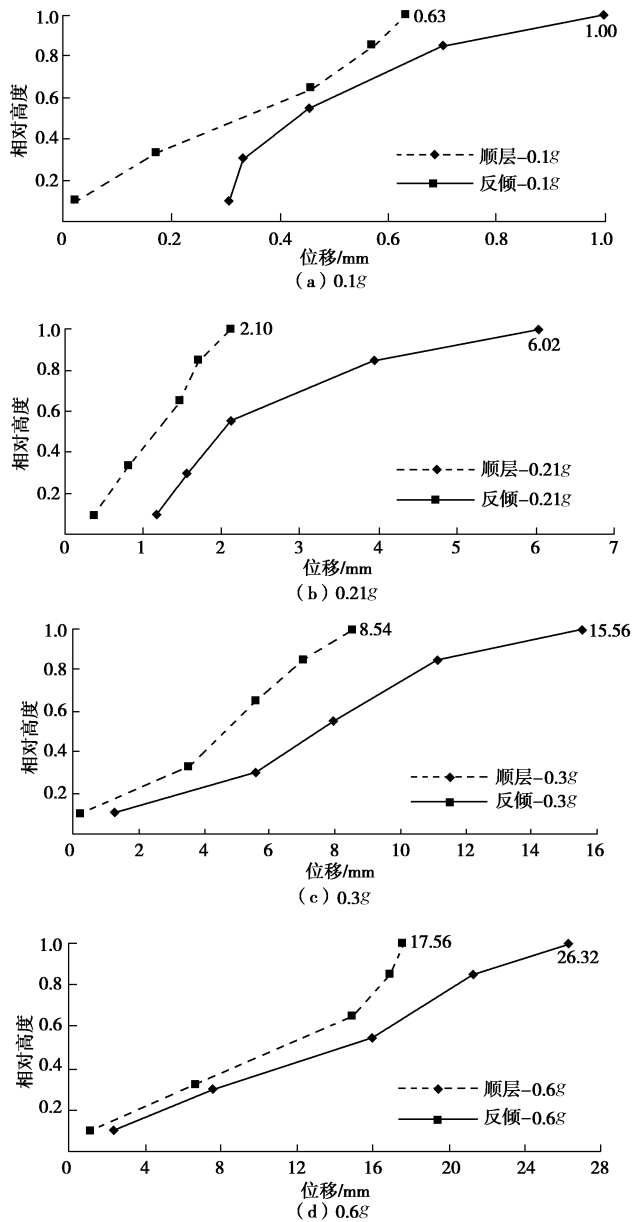


图 10 坡面位移

Fig. 10 Displacements of slope face

2.3 傅里叶谱分析

岩层倾向的不同和泥化夹层的存在必然导致地震波在顺层和反倾岩质坡体内具有不同的折射和反射路径,地震波频率成分发生变化。本文选取幅值为 0.21g 的汶川地震清屏波作为研究工况,以相对高度 0.3 处 A24 号测点和相对高度 0.9 处的 A2 号测点实测的水平向和垂直向加速度时程为研究对象,计算得到上述两个测点水平向和垂直向的傅里叶谱,如图 11,12 所示。

从图 10 中不难看出,在水平方向,傅里叶谱的第一个峰值几乎未发生变化,地震波在至下而上传播过程中,频率在 5~15 Hz 范围内的地震波成分被放大,傅里叶谱出现双峰特性,对比图 10 中 (a)、(b) 两图可以发现,顺层边坡对 5~10 Hz 的地震波成分均具有较强的放大效应,这使得顺层边坡顶部(相对高度 0.9)

傅里叶谱第二峰值并不明显,而反倾边坡仅对某一特定频率成分的地震波具有较明显的放大作用,本试验中反倾边坡对 6.27 Hz 的地震波成分放大最明显,反倾边坡顶部(相对高度 0.9)傅里叶谱第二峰值十分明显。顺层边坡的第二卓越频率大于反倾边坡,而反倾边坡第二卓越频率对应的傅里叶谱峰值大于顺层边坡。

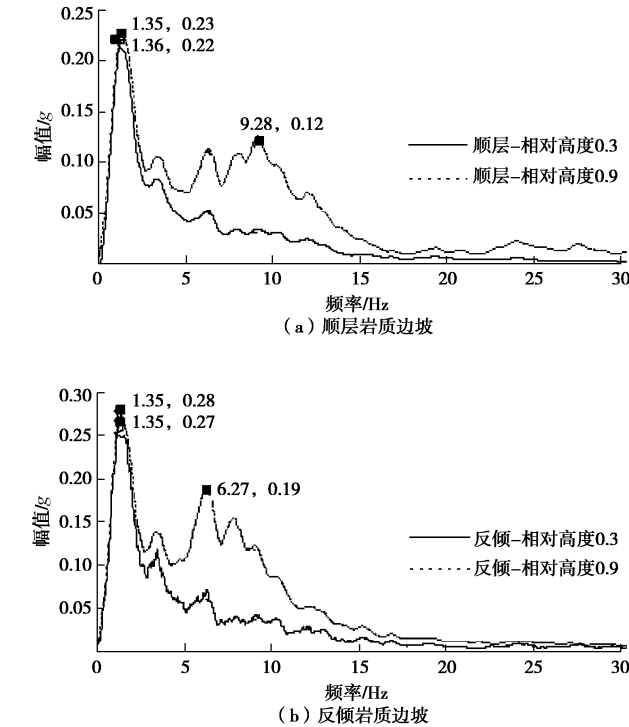


图 11 水平方向傅里叶谱

Fig. 11 Fourier spectra in horizontal direction

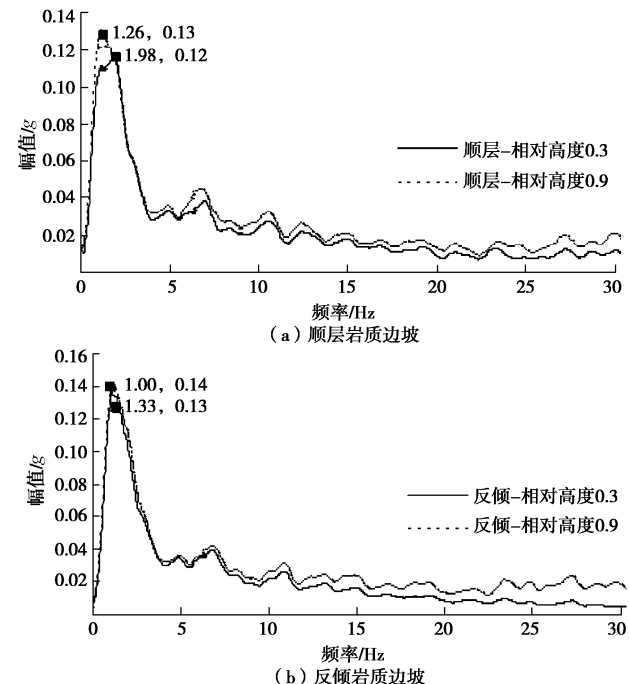


图 12 垂直方向傅里叶谱

Fig. 12 Fourier spectra in vertical direction

从图 11 中可以看出,在垂直方向,地震波在顺层边坡和反倾边坡内传播过程中频率成分具有相同的变化规律,坡顶(相对高度 0.9)的卓越频率低于坡脚(相对高度 0.3),顺层边坡由 1.98 Hz 降为 1.26 Hz,反倾边坡由 1.33 Hz 降为 1.00 Hz。同时,顺层和反倾边坡对输入地震波高频(≥ 5 Hz)部分具有轻微的放大作用。

3 破坏模式对比分析

在 0.1g 和 0.21g 的地震波作用下,顺层边坡未出现任何明显的破坏现象;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,坡顶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,坡顶边缘继续有散落体掉落,坡体中上部层间开始出现错动现象,但错动位移较小,如图 13(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,坡顶出现了明显的位移,受边界条件影响,坡体后缘与模型箱分离,如图 13(b)所示。



(a) 坡体中上部出现小幅度层间错动



(b) 坡顶张拉裂隙,后缘分离

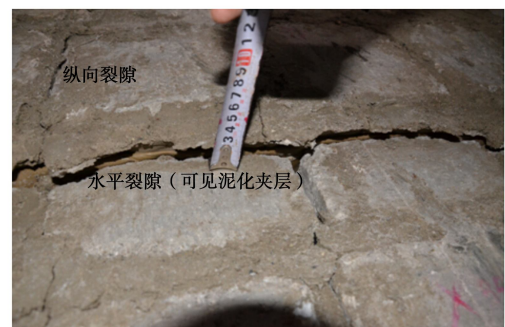
图 13 顺层边坡破坏形态

Fig. 13 Failure forms of bedding slope

梳理顺层边坡的破坏过程可以发现,顺层边坡的破坏主要表现为边坡后缘垂直的拉裂和沿饱水泥化夹层的剪切滑动,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,岩块受到水平地震力的作用,由于岩块间结构面的存在,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缝,且裂缝不断由表面垂直向下延伸,直至与泥化夹层贯通,贯通后,坡体被切割形成松散体,当地震强度进一步加大时,极易发生沿某一泥化夹层的整体失稳破坏。因此,与不含软弱夹层的顺层滑移—底部挤出一分层滑移型边坡失稳模式不同,含泥化夹层顺层岩质边坡的破坏模式为拉裂—滑移—崩落式。

当输入地震动幅值小于 0.4g 时,反倾边坡未出现明显的破坏现象,当输入地震动幅值达到 0.4g 时,坡肩开始出现局部掉块,坡体中上部沿泥化夹层出现水平向微裂隙。当输入地震动幅值达到 0.6g 时,坡体中上部的水平向裂隙长度进一步发展,上部坡体向坡面方向滑出,坡面外观上呈现鼓出的形态。同时,坡面沿岩块间结构面出现纵向裂隙,并与水平向裂隙贯通,如图 14(a)所示,中部泥化夹层被挤出,如图 14(b)所示,坡顶被震碎。综上所述,可以发现含泥化夹层反倾岩质边坡的破坏模式为:强震下坡体先出现坡肩的局部掉块,随后坡体沿中上部泥化夹层轻微滑动剪出,与此同时,坡体中上部出现纵向裂隙并与水平裂隙贯通,坡顶被震碎。与已有研究成果对比发现^[6],反倾边坡中泥化夹层的存在使得边坡的破坏剪出面上移。



(a) 中上部的水平和纵向裂隙



(b) 坡体中部泥化夹层被挤出

图 14 反倾边坡破坏形态

Fig. 14 Failure forms of count-tilt slope

综合对比含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡的破坏过程可以发现,含泥化夹层反倾岩质边坡较顺层边坡具有更高的地震稳定性,且两者的破坏模式具有较大的差异,主要体现在以下两个方面:第一,破坏启动加速度不同,顺层边坡在 $0.3g$ 地震波作用下出现明显的张拉裂隙,坡顶边缘出现局部掉块,而反倾边坡在 $0.4g$ 地震波作用下才开始出现沿泥化夹层的水平向微裂隙和坡顶局部掉块;第二,破坏形态不同,顺层边坡破坏主要表现为坡体后缘的垂直张拉裂隙、岩层沿泥化夹层的顺层滑动以及坡顶岩块崩落,而反倾边坡的破坏主要表现为坡面水平向和垂直向裂隙交错、因岩层向坡内方向运动导致泥化夹层挤出以及坡顶被震碎。

4 结 论

(1)反倾边坡坡体内部的加速度放大系数整体上大于顺层边坡;相对高度大于 0.4 时,顺层边坡坡面加速度放大系数大于反倾边坡,相对高度小于等于 0.4 时,顺层边坡坡面加速度放大系数与反倾边坡近似相等。

(2)顺层和反倾边坡坡面的位移随输入地震动强度的增大而大幅度增加,顺层边坡坡面位移大于反倾边坡,且随着输入地震波幅值的增加,顺层边坡和反倾边坡坡顶位移之间的差距增大。

(3)含泥化夹层顺层岩质边坡在 $0.3g$ 地震波作用下开始出现震害现象,而反倾边坡在 $0.4g$ 地震波作用下才开始出现震害现象,反倾边坡较顺层边坡具有更高的地震稳定性。

(4)顺层边坡破坏形式主要表现为坡体后缘的垂直张拉裂隙、岩层沿泥化夹层的顺层滑动以及坡顶岩块崩落,而反倾边坡的破坏形式主要表现为坡面水平向和垂直向裂隙交错、泥化夹层挤出以及坡顶被震碎。

本文利用大型振动台试验,对含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡的动力响应差异性进行了讨论,通过本文的研究发现,含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡破内和坡面的加速度响应规律、坡面位移以及边坡破坏模式均存在较大的差异性。本文虽然从宏观上研究了含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡的动力响应差异性,但是受试验条件限制,本文并未研究泥化夹层影响顺层和反倾岩质边坡动力响应的机理,以及泥化夹层厚度、起伏度等因素对顺层和反倾边坡动力特性的影响。根据已有的研究成果可知^[17-18],动力作用下泥化夹层的动力特性会发生较大的变化,必然引起边坡整体的动力特性的变化,泥化夹层动力特性对边坡整体动力响

应的影响机制还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 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(增刊 1):7-14. (XU Qiang, LI Wei-le. Study on the direction effects of land-slides triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(S1):7-14. (in Chinese))
- [2] 李秀珍,孔纪名,邓红艳,等.“5.12”汶川地震滑坡特征及失稳破坏模式分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):72-77. (LI Xiu-zhen, KONG Ji-ming, DENG Hong-yan, et al. Analysis on Characteristics and Deformation Failure Mode of Large-scale Landslides Induced by “5.12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3):72-77. (in Chinese))
- [3] 许 冲,戴福初,肖建章.“5.12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析[J].自然灾害学报,2011,20(4):147-153. (XU Chong, DAI Fu-chu, XIAO Jian-zhang. Statistical analysis of characteristic parameters of landslides triggered by May 12, 2008 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4):147-153. (in Chinese))
- [4] 罗 刚,胡卸文,张 耀.平面滑动型岩质边坡地震动力响应[J].西南交通大学学报,2010,45(4):521-526. (LUO Gang, HU Xie-wen, ZHANG Yao. Seismic dynamic responses of plane sliding rock slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(4):521-526. (in Chinese))
- [5] 肖克强,李海波,刘亚群,等.地震荷载作用下顺层岩体边坡变形特征分析[J].岩土力学,2007,28(8):1557-1564. (XIAO Ke-qiang, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. Study on deformation characteristics of bedding slopes under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8):1557-1564. (in Chinese))
- [6] 黄润秋,李 果,巨能攀.层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875. (HUANG Run-qiu, LI Guo, JU Neng-pan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5):865-875. (in Chinese))
- [7] 黄秋香,汪家林.某具有软弱夹层的反倾岩坡变形特征探索[J].土木工程学报,2011,44(5):109-114. (HUANG Qiu-xiang, WANG Jia-lin. Study of the deformation characteristics of an anti-dip slope with soft internal layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5):109-114. (in Chinese))

- Chinese))
- [8] 余 业. 反倾岩质滑坡成因机制及动力响应研究-以汶川地震透发罐滩滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. (YE Yu. Research on formation mechanism and dynamic response of counter-tilt rock slopes-taking the Guantan landslide induced by Wenchuan Earthquake as example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [9] 刘华丽, 朱大勇, 钱七虎, 等. 边坡三维端部效应分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1905 - 1909. (LIU Hua-li, ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu, et al. Analysis of three-dimensional end effects of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1905 - 1909. (in Chinese))
- [10] 卢坤林, 朱大勇, 许 强, 等. 三维滑裂面形状对安全系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(S2): 3679 - 3685. (LU Kun-lin, ZHU Da-yong, XU Qiang, et al. Impact of 3D slip surface's shape on factor of safety[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3679 - 3685. (in Chinese))
- [11] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(10): 2977 - 2988. (DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(10): 2977 - 2988. (in Chinese))
- [12] 刘汉香, 许 强, 徐鸿彪, 等. 斜坡动力变形破坏特征的振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(2): 334 - 339. (LIU Han-xiang, XU Qiang, XU Hong-biao, et al. Shaking table model test on slope dynamic deformation and failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 334 - 339. (in Chinese))
- [13] 文畅平, 杨果林. 地震作用下挡土墙位移模式的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1502 - 1512. (WEN Chang-ping, YANG Guo-lin. Large-scale shaking table tests study of seismic displacement mode of retaining structures under earthquake loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1502 - 1512. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 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-lue, 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))
- [16] 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))
- [17] 龚裔芳, 金福喜, 张可能, 等. 红砂岩泥化夹层力学特性及其对边坡稳定性的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, **29**(2): 220 - 223. (GONG Yi-fang, JIN Fu-xi, ZHANG Ke-neng, et al. Influence on slope stability of physical-mechanical property of clayer thin interlayer in red sandstone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, **29**(2): 220 - 223. (in Chinese))
- [18] 杨长卫, 高洪波, 张建经. 岩质高陡边坡地震动力响应共性和差异性[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, **45**(3): 18 - 26. (YANG Chang-wei, GAO Hong-bo, ZHANG Jian-jing. Research on the generality and otherness of seismic responses of the steep rock slope[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, **45**(3): 18 - 26. (in Chinese))