

含水平软弱夹层斜坡变形破坏特征的振动台试验

周 飞¹, 许 强¹, 刘汉香¹, 王 龙²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;
2. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017)

摘 要: 已有研究表明, 强度相对较低的软弱夹层会对地震波产生吸收或强化作用, 在一定程度上控制了斜坡的地震动力响应及变形破坏特征。试验以振动台为研究手段, 设计并完成含不同厚度水平软弱夹层的两个单面斜坡概念模型。通过记录斜坡模型的变形破坏过程, 分析其动力响应特征。试验结果表明, 斜坡模型的变形破坏与地震动力参数密切相关: 1. 模型在正弦波激振下较天然波变形明显; 2. 合成向 ZX、水平单向 X 和竖直单向 Z 的激振下, 变形程度依次减弱; 3. 随着激振强度增加, 变形破坏愈明显。两模型的变形破坏均出现在坡体中上部, 且最大破坏深度距坡顶约 50 cm。含薄夹层斜坡的破坏范围分布于整个中上部, 坡顶近 1/2 发生变形和滑移破坏, 呈现出“拉裂 - 剪切 - 滑移 - 碎屑流化”破坏模式, 而含厚夹层斜坡的破坏范围仅集中于软弱夹层以上坡肩以下, 两侧未达坡体边缘的局部范围, 形成浅表的“凹岩腔”, 呈现出“震裂 - 剥落”破坏模式。在相同的加载条件下, 含薄夹层斜坡变形破坏先于含厚夹层斜坡。试验模拟再现了含水平软弱夹层斜坡在强震作用下的变形破坏规律, 为地震诱发次生地质灾害的研究和防治提供了有力的依据。

关键词: 斜坡; 水平软弱夹层; 振动台试验; 变形破坏特征; 破坏机制

中图分类号: P642, TU458

文献标志码: A

“5·12”汶川地震是中国大陆近百年来发生在人口较为密集山区、破坏性最大的一次灾难性地震^[1]。由于震级高、持续时间长、地形地质环境复杂, 地震诱发了数以万计的崩塌、滑坡灾害^[2-4]。通过对震区大量灾害点的现场调查和分析研究表明, 其分布与发震断裂的距离、坡度、高程和岩性特征有关^[2,5], 同时还表现出与常规重力作用下不同的动力变形破坏特征。为了揭示汶川地震诱发地质灾害的成因机理, 黄润秋等^[6]提出了包括五大类、14 种类型的成因机制分类体系, 许强等^[7]将其动力特征概括为震裂溃屈、临空抛射和碎屑流化型。强震作用下, 斜坡失稳破坏的形式和机制复杂, 其中不同的岩性与地质灾害的发育虽然没有显著的对应关系, 但却决定了地质灾害的类型。通常情况下, 滑坡多发生在软岩, 硬岩中多发生崩塌^[2], 而斜坡岩体中

强度相对较低的软弱夹层对斜坡岩体的力学性质和稳定性都有十分重要的意义^[8]。尤其在地震作用下, 软弱夹层对地震波产生吸收或强化作用, 往往在一定程度上控制了斜坡的地震动力响应和变形破坏特征^[9]。

目前国内学者对地震作用下, 软弱夹层对斜坡稳定性的影响进行了大量的研究, 并取得一定的成果, 主要有利用相似试验模型和数值模拟, 研究夹层对斜坡失稳破坏以及对地震波透射和反射的影响^[10]。由于斜坡岩体结构和动力问题的复杂性, 近年来有学者^[11-15]利用大型振动台试验, 模拟研究了斜坡的动力响应特征和变形破坏模式。据笔者了解, 目前还没有关于含不同厚度水平软弱夹层的大型振动台试验研究, 因此试验以含不同厚度的水平软弱夹层斜坡为研究对象, 采用中国核动力研究设

收稿日期 (Received date): 2013 - 12 - 30; **修回日期** (Accepted): 2014 - 02 - 26。

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究计划 (973 计划) (2013CB733200)、国家杰出青年科学基金 (41225011)、长江学者特聘教授岗位资助。[National Basic Research Program (“973” Project) (2013CB733200), the National Science Found for Distinguished Young Scholars of China (41225011), the Chang Jiang Scholars Program of China.]

作者简介 (Biography): 周飞 (1988 -), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土工程特性。[Zhou Fei, male, born in Dazhou of Sichuan, graduated student, majoring in Engineering Property of rock and soil body.] E-mail: 363845842@qq.com

计院的大型振动台,模拟再现斜坡在强震作用下变形、失稳破坏的整个过程,分析研究斜坡的地震响应特征,以及不同地震波类型、频率、激振方向、振幅对该特性的影响。在此基础上,分析总结了斜坡的变形破坏机制和模式。

1 试验概况

1.1 模型设计

汶川地震区广泛分布有千枚岩、页岩、泥岩等软岩^[5],其软弱夹层多为粘土岩、糜棱岩或其他性状相对软弱的岩层^[16]。试验最终确定软岩以泥岩为模拟对象,软弱夹层则以粘土为主要成分的斜坡概念模型,变量因素则主要考虑软弱夹层的厚度。为了便于对比研究,试验设计了含不同厚度水平软弱夹层的两个单面斜坡模型(图1),以下简称为“薄夹层斜坡”和“厚夹层斜坡”。模型总高180 cm,其中斜坡高160 cm,下伏岩层厚度20 cm,每个模型底部总长165 cm,顶部宽57.6 cm,直线坡度60°。软弱夹层在坡面的出露位置距坡顶面100 cm,均为水平,其中左坡夹层厚度为3 cm,右坡夹层厚度为15 cm,模型边界采用厚度为20 cm的聚苯乙烯泡沫,作为减震层。



图1 模型的几何特征(单位:cm)
Fig.1 Geometric features of the model(unit:cm)

1.2 试验设备

本试验采用中国核动力研究设计院二所抗震实验室的三向六自由度大型地震模拟振动台。该试验装置承载能力大,性能先进,并且拥有先进的数字控制、数据采集和振动测试系统。振动台台面大小为6 m×6 m,台面最大负重60 t,频率范围0.1~80 Hz,水平向最大位移±150 mm,垂直向最大位移±100 mm,满负载时水平向最大加速度1 g,垂直向最

大加速度0.8 g,空载时水平向最大加速度3 g,垂直向2.6 g。

1.3 材料的物理力学参数及配比

模型试验主要模拟研究2008年汶川地震区斜坡发育的典型岩性及斜坡结构。为了使模型试验中出现的物理现象尽可能再现或反映真实现象,以相似原理为基础^[17],设计原型和模型间的相似关系,选择密度、弹性模量和时间作为相似控制量,分别确定了软岩和软弱夹层的相似系数,详细的相似关系设计过程见文献^[16]。通过室内反复的力学特性试验(无侧限抗压强度试验获得弹性模量和泊松比,直剪试验获得内聚力和内摩擦角),在尽可能满足本试验各物理量相似关系的前提下,最终确定了模型材料的物理力学参数(表1),同时确定的模型中软岩相似材料^[18]及配比为重晶石粉:石英砂:石膏:甘油:水=32:56:6:1:7,软弱夹层相似材料及配比为石英砂:粘土:水=20:66:14。在模型制作过程中,将各种材料均匀搅拌混合,采用从下到上,以每砌筑5 cm振动夯实的逐层砌筑方式制作模型斜坡(图2)。

表1 模型材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of model materials		密度 ρ	弹性模量	泊松	抗压强度	内聚力	内摩擦
岩性		$/(t/m^3)$	$E/(MPa)$	比 μ	$\sigma_c/(MPa)$	$C/(kPa)$	角 $\varphi/^\circ$
软岩	原型值	2.48	1 900	0.31	10.5	520	33.8
	实际值	2.4	50.2	0.3	0.34	37.1	34.9
软弱	原型值	1.6	41	0.35	\	30	35
	实际值	2.32	4.8	0.35	\	10	27.3

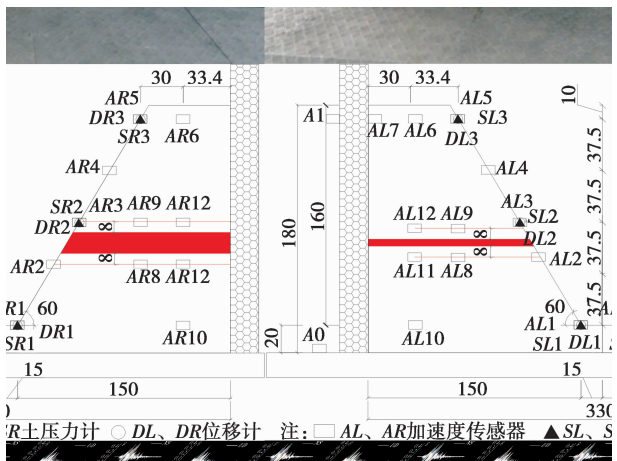


图2 放置于振动台面上的模型斜坡侧视图

Fig.2 Side view of slope model on the vibration table

1.4 传感器的类型及埋设

试验采用的传感器包括三分量加速度计,水平位移计和土压力计,共计加速度计 13 个(AL 和 AR),位移计 3 个(D),土压力计 3 个(S):

1. 压电式加速度传感器,三向,量程 6.0 g,外型尺寸 12 mm × 14 mm × 8 mm。

2. 微型电阻应变式土压力计,量程 0.5 MPa,外型尺寸为 30 mm × 13 mm。

3. LVDT 拉杆式位移传感器,量程为 ±50 mm。

为了研究强震作用下斜坡的动力特性及响应规律,需在斜坡上不同位置处布置各类传感器,以获取加载过程中斜坡加速度、位移和应力的同步响应数据。为减小两侧边界的影响,本试验中除个别传感器的安装位置有着特殊目的外($A0$ 布置在振动台台面和 $A1$ 安置在模型箱外表面),其余传感器全部布置在模型的中间纵剖面上。两侧斜坡模型的传感器布置位置完全相同,具体见图 3。



图3 模型传感器布置剖面图(单位:cm)

Fig.3 Profile layouts of sensors in model slope(unit:cm)

1.5 地震波加载方案

试验输入波采用天然波和正弦波两种类型。天然波模拟 1995 年日本 Kobe 地震中实测的加速度记录(水平 NS 向和竖直 UD 向,图 4)和“5·12”汶川地震中卧龙地震台实测的加速度记录(水平 EW 向和竖直 UD 向,图 5)(时间压缩比为 4)。正弦波采用 5 Hz、10 Hz 和 15 Hz 共 3 个频率等级。每类地震波分别先施加竖直 Z 向,后施加水平 X 向两种激振。为了模拟自然状态下的地震波作用,对汶川波同时施加了 X 和 Z 向的合成激振($ZX45^\circ$)。所有地震波均按振幅加速度从小到大施加,以模拟天然地震波。

本试验在所有激振开始之前以及之后的不同阶

段均有施加白噪声扫描,以测定模型结构的动力特性。试验共设计 55 个工况,对模型从小到大逐级施加不同振幅的加速度荷载,地震波加载制度见图 6。每级加速度施加完成后停止一段时间,观测并记录模型的变形现象。当斜坡模型出现大变形,则施以振幅加速度 ≥ 0.55 g,频率为 10 Hz(工况 52 ~ 55)的水平 X 向正弦波进行破坏性试验,直至斜坡模型大范围失稳破坏。

2 斜坡变形破坏特征

试验过程中,采用摄像和拍照记录斜坡的整个宏观变形破坏过程(表 2)。通过对影像资料和变形破坏过程的分析表明,斜坡的变形破坏特征随着输入波的类型、方向、振幅、夹层厚度不同而具有显著的差异。

2.1 输入波的类型

正弦波对斜坡的破坏程度要大于天然波。当正弦波的振幅加速度为 0.55 g,薄夹层和厚夹层斜坡的坡面、坡顶均出现了多条宏观裂隙,且薄夹层斜坡局部还出现掉块和滑移破坏,而天然波在加速度 < 0.8 g 时,两侧斜坡还均未出现明显的宏观变形。

2.2 激振方向

竖直 Z 向、水平 X 向和合成 $ZX45^\circ$ 向对斜坡的破坏作用依次增强。当天然波(汶川波)振幅加速度为 1 g,激振方向从 $Z \rightarrow X \rightarrow ZX$ 变化过程中,每次激振方向改变后,两侧斜坡均会出现明显变形和裂隙的加大。

2.3 加速度振幅

振幅越大,斜坡破坏程度越明显。正弦波从 0.55 ~ 0.8 g 时,两侧斜坡坡体、坡顶的裂隙随着振

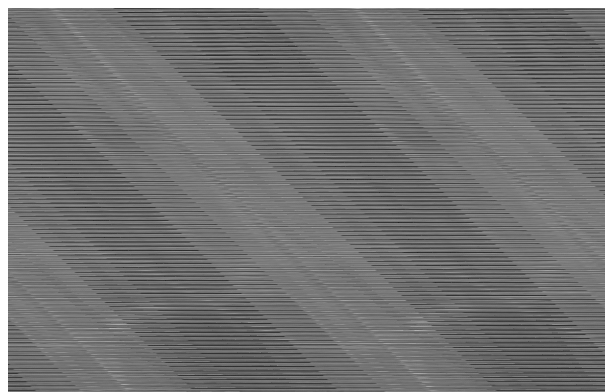


图4 1995 年日本 Kobe 地震波(采样频率:50 Hz)

Fig.4 Kobe Earthquake waves of Japan in 1995(Sample frequency: 50 Hz)

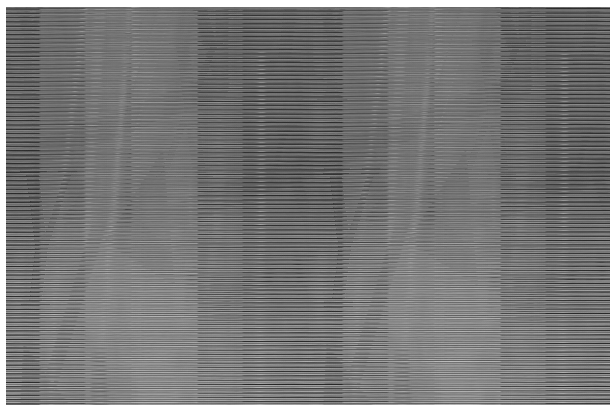


图 5 2008 年四川汶川地震波(采样频率:200 Hz)

Fig. 5 Wenchuan Earthquake waves of Sichuan in 2008

(Sample frequency: 200 Hz)

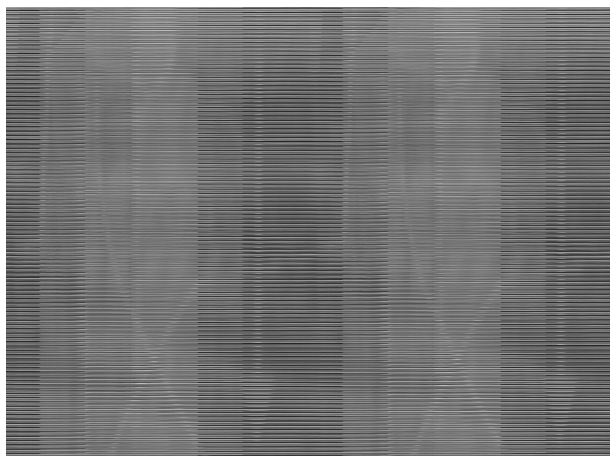


图 6 试验地震波加载顺序

Fig. 6 Seismic wave loads of test

幅的加大而不断延伸加宽。从开始出现微小拉裂隙到局部掉块再到薄夹层斜坡上半段近 $1/2$ 发生变形和滑移破坏,厚夹层斜坡中上部的震裂剥落。

2.4 软弱夹层厚度

薄夹层斜坡和厚夹层斜坡最大破坏深度,均出现在距坡顶约 50 cm 处,但薄夹层斜坡先于厚夹层斜坡发生破坏,同时其破坏程度及规模较厚夹层大,且破坏位置有所差别。1. 无论是正弦波还是天然波,薄夹层均先于厚夹层发生破坏。当加载正弦波,振幅加速度为 0.5 g 时,薄夹层斜坡就开始发生可见的宏观位移,而厚夹层斜坡无明显变形位移。当加载天然波,加速度为 0.8 g,激振方向为 Z 向时,薄夹层斜坡开始产生宏观裂缝,而厚夹层斜坡要到激振方向变为 ZX 向时才有微小拉裂隙。2. 薄夹层斜坡最终发生贯通性破坏,近 $1/2$ 坡宽发生变形和滑移破坏,滑体迅速转化为碎屑流(图 7~11)停积于

坡脚,模型斜坡产生 1 cm 沉降,而厚夹层斜坡的破坏范围仅集中在软弱夹层以上坡肩以下,两侧未达坡体边缘的局部范围,并未形成贯通性破坏,但由于软弱夹层厚度较薄夹层厚,最终厚夹层斜坡产生了 3 cm 沉降。3. 虽然薄夹层斜坡和厚夹层斜坡均是从坡顶开始产生的微小破坏裂隙,但薄夹层斜坡破坏位置是从坡体顶部开始,逐渐向下、向后发展,且从右至左,最后扩展到软弱夹层以上的整个坡肩地带,而厚夹层斜坡仅在软弱夹层以上坡肩以下的局部范围内,随着震动的持续而产生掉皮剥落,形成一个浅表层的“凹岩腔”(图 12)。

为了更好地说明在强震作用下,不同厚度的软弱夹层对斜坡变形破坏位置具有控制性作用。本文参考前人研究成果,采用加速度放大系数(坡体内某一监测点的加速度记录值的峰值与振动台台面加速度记录值峰值的比值)对斜坡的变形破坏特征进行简单分析。由于加速度放大系数具有方向性,因此选取振幅加速度 1 g, ZX45° 向的汶川波作为研究对象。根据试验时传感器所记录的数据,作出两侧斜坡 X 向和 Z 向加速度放大系数随高程的变化曲线,如图 13 和图 14。

如图 13 所示,含水平薄夹层斜坡在强震作用下,其加速度放大系数整体上呈现出随着高程增加而逐渐增大的趋势,且均 >1 , X 向最大为 4.22(软弱夹层顶面), Z 向最大为 3.44(坡顶位置)。这一结果表明,地震波具有高程放大效应,同时印证了薄夹层斜坡其变形破坏主要集中于软弱夹层以上的坡肩地带。而图 14 表明含厚夹层斜坡的加速度放大系数随着高程的增加表现出先增大后减小的特征,其最大加速度放大系数出现在软弱夹层顶面(X 向 2.09, Z 向 1.07)。因此,含厚夹层斜坡的加速度放大系数随高程的变化特征与斜坡的变化破坏出现在软弱夹层以上坡肩以下,形成浅表的“凹岩腔”这一结果相符合。综上所述,强震作用下含软弱夹层斜坡的变形破坏特征与软弱夹层厚度密切相关,但软弱夹层是如何控制斜坡的变形破坏还需做进一步的分析研究。

3 斜坡变形破坏机制

通过对模型斜坡的变形破坏过程分析可知,含不同厚度软弱夹层斜坡,其变形破坏机制存在差异,本文在试验的基础上结合前人的研究成果,将薄夹

表 2 斜坡模型变形破坏过程
Table 2 Deformation and failure process of slope model

工况	波形	激振方向	振幅/g	变形破坏现象
1 ~43	/	/	/	两侧斜坡均处于稳定状态,无明显的宏观变形破坏
44	正弦波 10 Hz	X	0.5	薄夹层斜坡坡顶及距坡顶 30 ~ 40 cm 处的坡体内开始出现沿走向的微裂隙(图 7),厚夹层斜坡仍无明显变形
45 ~47	汶川波	Z→X→ZX45°	0.8	薄夹层斜坡坡顶微裂隙渐进累积加宽、加长,并不断伴随有新的裂隙产生,最终坡顶产生宽约 0.5 cm、长约 20 cm,顺坡走向延伸的裂缝。当激振方向为 Z 向和 X 向时,厚夹层斜坡均未产生宏观变形,激振方向变为 ZX 向时,厚夹层斜坡坡顶开始产生微小拉裂隙,变形加剧(图 8)
48	白噪声	/	/	/
9	汶川波	Z	1	薄夹层斜坡坡体内开始出现微裂隙,可见一定的沉降,软弱夹层开始出现微小的压缩变形,厚夹层斜坡坡顶原有裂隙加宽、加长
50		X	1	薄夹层斜坡初期裂缝继续延伸,厚夹层斜坡坡体内开始出现微裂隙
51		ZX45°	1	两侧斜坡裂隙扩展,坡体松动,沉降加大,两侧斜坡均未出现掉块和整体贯通性破坏
52		X	0.55	薄夹层斜坡坡顶出现多条张拉裂缝,且斜坡右侧(背向斜坡)从坡肩开始出现局部掉块、滑移(图 9),厚夹层斜坡坡顶开始出现沿斜坡走向和垂直斜坡走向的微裂隙
53	0.6		薄夹层斜坡拉张裂缝向后扩展并不断加宽、加深,同时掉块、滑移范围从右至左逐步扩展到整个斜坡坡肩地带,厚夹层斜坡除拉裂隙沿走向有所延伸外,无其他明显破坏变形	
54	正弦波 10Hz		X	0.7
55			0.8	薄夹层斜坡严重破坏,近 1/2 坡宽发生了变形和滑移(图 11),多条拉张裂缝发展,贯通,厚夹层斜坡中上部剥落加重且范围不断扩大,形成浅表的凹岩腔(图 12),坡顶中部出现长约 40 cm 裂缝,但并未形成贯通性破坏,最终薄夹层斜坡沉降量增至 1 cm,厚夹层斜坡沉降量增至 3 cm,两侧斜坡的软弱夹层产生可见的压缩变形,且向坡面方向挤出,最大破坏深度均出现在距坡顶约 50 cm 处

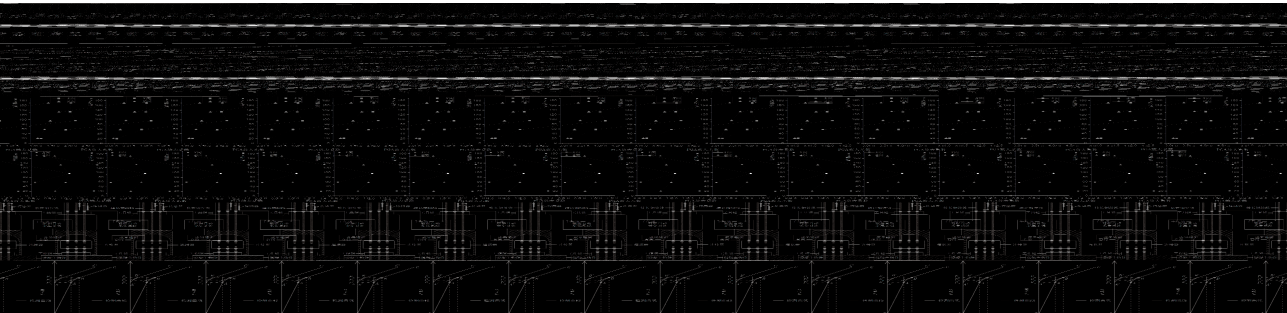


图 7 薄夹层斜坡顶部拉裂隙

Fig. 7 The top pull cracks of slope with thin interlayer

图 8 厚夹层斜坡顶部拉裂隙

Fig. 8 The top pull cracks of slope with thick interlayer

图 9 薄夹层斜坡局部滑移破坏

Fig. 9 The local sliding failure of slope with thin interlayer

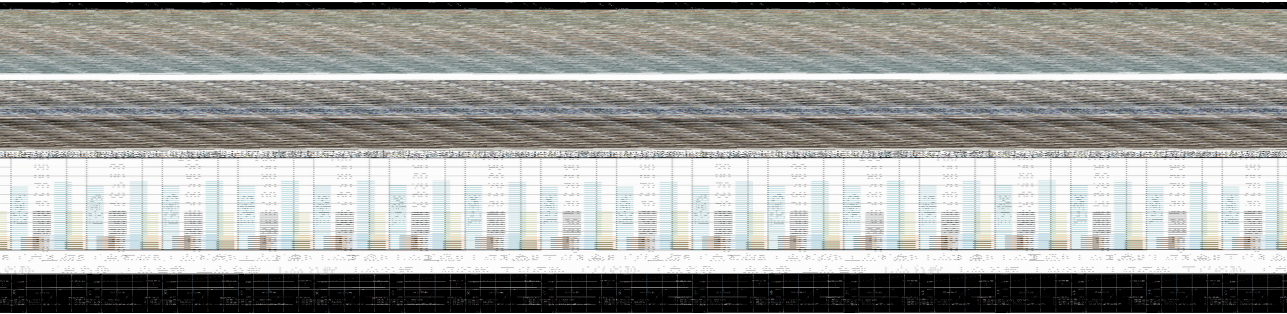


图 10 厚夹层斜坡局部掉皮

Fig. 10 The local impellers of slope with thick interlayer

图 11 薄夹层斜坡最终破坏形态

Fig. 11 The final failure pattern of slope with thin interlayer

图 12 厚夹层斜坡最终破坏形态——凹岩腔

Fig. 12 The final failure pattern of slope with thick interlayer (Hollow of rock)

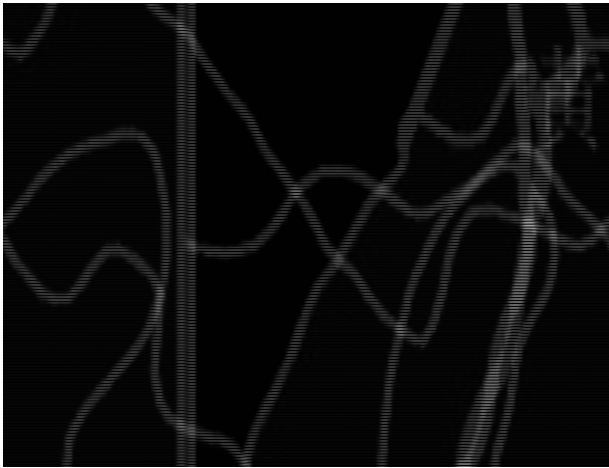


图 13 薄夹层斜坡加速度放大系数随高程的变化
Fig. 13 The acceleration amplification coefficients along with the change of elevation of slope with thin interlayer

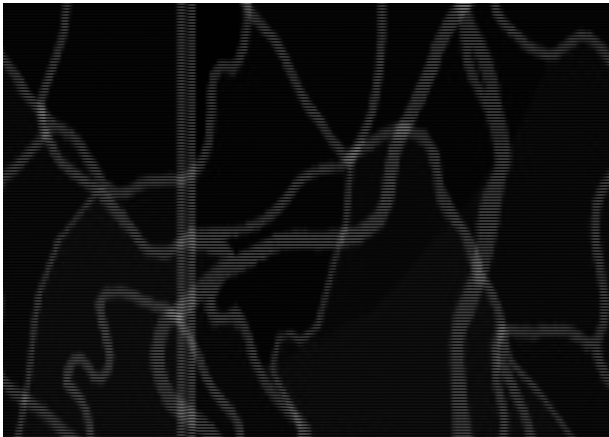


图 14 厚夹层斜坡加速度放大系数随高程的变化
Fig. 14 The acceleration amplification coefficients along with the change of elevation of slope with thick interlayer

层斜坡变形破坏模式归纳为“拉裂-剪切-滑移-碎屑流化”型,厚夹层斜坡变形破坏模式归纳为“震裂-剥落”(图 15)。

3.1 拉裂-剪切-滑移-碎屑流化型

薄夹层斜坡在强大的地震力作用下,产生松动。坡体高程对地震波的放大效应,使斜坡坡顶产生的拉裂隙,破坏了坡体的完整性。持续的地震力作用,斜坡产生累进变形破坏和局部应力集中,从而坡体内产生压张裂隙^[19]。在后续强大的水平地震惯性力作用下,坡体内的锁固段被剪断,裂隙贯通而产生高位滑坡。由于斜坡岩体的抗拉强度远小于抗压强度,在超强的地震(水平和竖直)惯性力和自重力作用下,滑坡体高速运动,相互碰撞,迅速转化为碎屑流,停积于坡脚。如大光包滑坡、王家岩滑坡、东河口滑坡、老鹰岩滑坡、肖家桥滑坡和小岗剑滑坡等^[6],坡体在强大地震力作用下,均似“散粒体”一样溃散、滑动下来。

3.2 震裂-剥落

厚夹层斜坡在地震力作用下,坡体松弛,在坡顶和坡体内产生微裂隙。地震力持续作用,使斜坡中上部原表层松散层在水平惯性力作用下,脱离斜坡,出现零星顺坡溜塌。由于表层坡体溜塌,产生局部卸荷带,加之后续地震力的作用,加剧斜坡的变形和松散,从而使得斜坡中上部产生局部范围的剥落、捧出,形成“凹岩腔”。若继续加大地震振幅加速度,凹岩腔会继续扩大、加深,最后产生坡体坐塌的破坏模式,表现为“齐腰斩断”^[6]。厚夹层斜坡破坏出现在软弱夹层以上而未达斜坡坡肩的局部范围,推测是由于地震波在坡体内传播时,遇到厚层软弱夹层

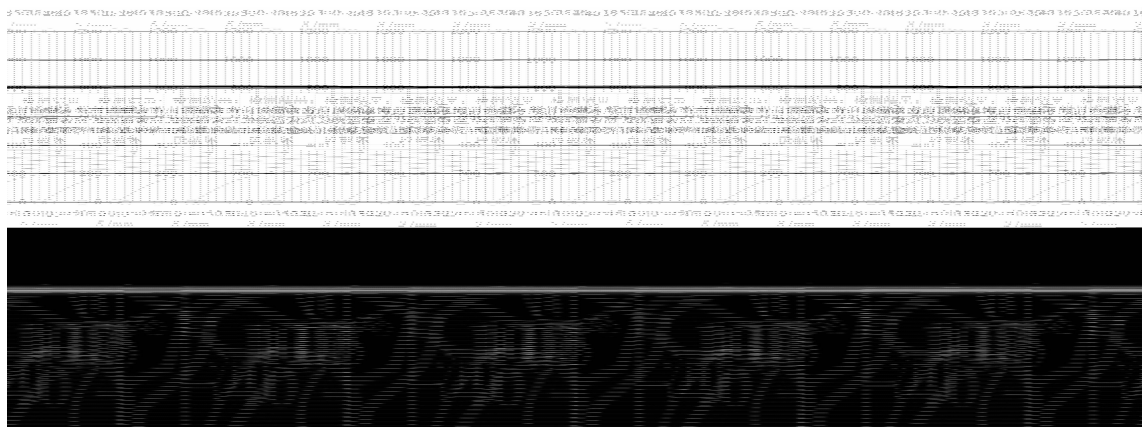


图 15 斜坡变形破坏模式示意图
Fig. 15 Schematic diagram of slope deformation and failure modes

产生复杂的折射和反射现象,使斜坡破坏处的地震动卓越频率与模型斜坡自振频率接近,坡面局部范围内的加速度峰值放大效应显著增强^[11],从而产生局部的掉皮、剥落,并未发生大规模的滑移或崩塌。如“5.12”地震后现场排查结果表明,在北川、青川、汶川、绵竹、都江堰、彭州等极震区,发现上千处“裂”而未“滑”、“松”而未“动”,但局部出现剥落的震裂松动山体^[7]。

4 结论

本文设计并完成了含不同厚度水平软弱夹层的斜坡振动台模型试验,再现了汶川地震诱发次生灾害的全过程,为构造活动强烈的山区地质灾害的研究和防治提供了有力的依据和理论基础。根据试验过程中记录的模型变形破坏影像资料,分析并总结了两类斜坡的动力变形破坏特征及变形破坏机制,主要得到以下结论:

1. 地震作用下,含软弱夹层斜坡的变形破坏特征不仅与地震动力参数有关,还与斜坡内软弱夹层的厚度有关,这与前人研究成果^[11-15]和汶川地震诱发的典型崩滑地质灾害现象一致^[4,6-7]。

2. 其他条件相同的情况下,正弦波比天然波对斜坡影响大;激振强度越大,斜坡变形破坏越明显;合成ZX向、水平X向、竖直Z向对斜坡变形破坏程度的影响依次减弱。

3. 薄夹层斜坡先于厚夹层斜坡发生破坏,且破坏规模和程度更大。两斜坡最大破坏深度距坡顶约50 cm,且破坏位置均集中于斜坡的中上部位,体现了斜坡高程对地震波的放大效应。薄夹层斜坡的破坏分布于软弱夹层以上的整个坡肩地带,且破坏范围向坡内延伸至近1/2的坡宽,而厚夹层斜坡主要集中在软弱夹层以上坡肩以下,且破坏范围局限于坡面中间部位,形成浅表的“凹岩腔”。

4. 薄夹层斜坡的破坏模式可以归纳为“拉裂-剪切-滑移-碎屑流化”型而厚夹层斜坡的破坏模式可以归纳为“震裂-剥落”型。

参考文献 (References)

[1] Huang Runqiu, Li Weile. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake, China[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(03): 1-7 [黄润秋, 李为乐. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(03): 1-7]

[2] Huang Runqiu, Li Weile. 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): 2585-2592 [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): 2585-2592]

[3] Huang Runqiu. Characteristics of geological disasters of “5·12” Wenchuan Earthquake and recommendation on its impact on reconstruction[J]. Chinese Geological Education, 2008, (2): 21-24 [黄润秋. “5·12”汶川大地震地质灾害的基本特征及其对灾后重建影响的建议[J]. 中国地质教育, 2008, 02: 21-24]

[4] Yin Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(04): 433-444 [殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(04): 433-444]

[5] Xu Qiang. Main types and characteristics of the geohazards triggered by the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(02): 86-93 [许强. 汶川大地震诱发地质灾害主要类型与特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(02): 86-93]

[6] Huang Runqiu. Mechanics and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(06): 1239-1249 [黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(06): 1239-1249]

[7] Xu Qiang, Huang Runqiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(06): 721-729 [许强, 黄润秋. 5·12汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(06): 721-729]

[8] Xu Baotian, Yan Changhong, Chen Hanyong, et al. Experimental study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3077-3081 [许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 斜坡岩体软弱夹层力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3077-3081]

[9] Huang Runqiu, Yu Jiashun. Modelling of the effects of properties of a buried weak layer on seismic waves[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(03): 312-317 [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(03): 312-317]

[10] Du Xiaoli, Song Hongwei, Wei Jingsheng. Numerical simulation research on stability of slope with weak sandwich under seismic loadings[J]. J of China Three Gorges Univ. : Natural Sciences, 2010, 32(01): 39-42 [杜晓丽, 宋宏伟, 魏京胜. 地震对软弱夹层斜坡稳定性影响数值模拟研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(01): 39-42]

[11] Xu Guangxing, Yao Lingkan, Gao Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(03): 624-632 [徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(03): 624-632]

[12] Huang Runqiu, Li Guo, Ju Nengpan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(05): 865-875

- [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(05): 865–875]
- [13] Dong Jinyu, Yang Guoxiang, Wu Faquan, 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): 2977–2982, 2988 [董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质斜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): 2977–2982, 2988]
- [14] Zou Wei, Xu Qiang, Liu Hanxiang, et al. Large-scale shaking table model test study on failure of layered rocky slope under strong ground motion[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(04): 143–149 [邹威, 许强, 刘汉香, 等. 强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(04): 143–149]
- [15] Xu Qiang, Liu Hanxiang, Zou Wei, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2420–2428 [许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420–2428]
- [16] Wang Long. Large-scale shaking table test about dynamic response of slopes containing weak intercalations under the effect of earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. [王龙. 地震作用下含软弱夹层斜坡动力响应的大型振动台试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.]
- [17] Zhang Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests [J]. Journal Of Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 1997, 17(02): 52–58 [张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(02): 52–58]
- [18] Zou Wei, Xu Qiang, Liu Hanxiang. Similar materials in large-scale shaking table model test[J]. Mountain Research, 2012, 30(04): 497–501 [邹威, 许强, 刘汉香. 大型振动台试验相似材料研究[J]. 山地学报, 2012, 04: 497–501]
- [19] Yang Xuzhao, Cui Fangpeng. Research progress and prospects on collapsing-sliding response of slope triggered by seismic dynamic action[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(02): 1–13 [杨旭朝, 崔芳鹏. 地震动力作用触发的斜坡崩滑响应研究现状及展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(02): 1–13]

Shaking Table Model Test on Deformation and Failure Characteristics of Slope with Horizontal Weak Interlayer

ZHOU Fei, XU Qiang, LIU Hanxiang, WANG Long

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Sichuan Communication Surveying&Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: Previous studies indicate that relatively low strength of weak interlayer can absorb or amplify seismic wave, and it controls to some extent the dynamic response and failure characteristics of slope. By means of shaking table test, two single-face conceptual models with different thickness of horizontal weak interlayer were designed. By recording deformation and failure process of the model, its dynamic response characteristics were studied. Test results show that the deformation and failure of slope are closely related to the seismic dynamic parameter. (1) Deformation of model is more obvious under the sinusoidal vibration than the natural wave. (2) The destruction of synthesis of excitations in XX – direction, X – direction and Z – direction at the slope becomes weakening in turn. (3) With the increase of vibration strength, the deformation and failure becomes more obvious. The deformation and failure mainly appear in the upper part of slope model and the maximum damage depth reaches about 50 cm away from the top. For the slope with thin interlayer, the failure area distributes the whole upper-middle part of slope and nearly 1/2 top of slope occur deformation and slip failure, which presents the cracking-shearing-sliding-debris flow failure mode. But for the slope with thick interlayer, the deformation and failure are confined the area above the weak layers and under the slope shoulder and both sides fail to reach the edge of slope body, which forms the superficial hollow and presents the shattering-scaling failure mode. Under the same condition of seismic wave, the deformation and failure of slope with thin interlayer priors to thick interlayer. The test simulated and reproduced deformation and failure law of slope with horizontal weak interlayer under strong earthquakes. It provided strong basis for research and prevention of secondary disaster because of earthquakes.

Key words: slope; horizontal weak interlayer; shaking table test; deformation and failure characteristics; failure mechanism