

DOI: 10.11779/CJGE201804021

土体含水率对边坡动力破坏模式及动力响应影响的振动台试验研究

杨 兵, 孙明祥, 王润民, 杨 涛*, 冯 君, 周德培

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 正确认识地震作用下边坡的破坏模式及动力响应特征可以为边坡抗震设计提供理论指导。为了探讨边坡土体含水率的变化对边坡破坏模式及动力响应的影响, 针对该问题开展了室内振动台模型试验, 分析了不同含水率边坡失稳破坏的物理过程, 以及在地震荷载作用下边坡动力响应规律。试验结果表明土体含水率对边坡破坏模式有较大影响, 含水率 6.8% 和 10% 的砂土边坡分别表现为震裂-滑移型和震裂-散裂型滑坡破坏形式, 含水率 18.1% 和 24.6% 的黏土边坡分别表现为震裂-散裂性和震裂-蠕滑型滑坡破坏形式; 在参数考虑的范围内含水率较大的边坡比含水率较小的边坡更稳定; 在水平动力载荷作用下, 边坡表面的土体位移变化规律能够反应出边坡失稳破坏特征; 对于该文讨论的砂土和黏土边坡而言, 含水率大的边坡加速度放大效应弱于含水率小的边坡; 从土体阻尼角度解释了含水率变化对边坡失稳影响的机理。

关键词: 土体含水率, 边坡, 破坏模式, 动力响应, 振动台试验

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)04-0759-09

作者简介: 杨 兵(1976-), 男, 副教授, 主要从事边坡动力学及稳定性研究。E-mail: yangb@home.swjtu.edu.cn。

Shaking table tests on influences of water content of soils on dynamic failure modes and dynamic responses of slopes

YANG Bing, SUN Ming-xiang, WANG Run-ming, YANG Tao, FENG Jun, ZHOU De-pei

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

Abstract: Understanding exactly the failure mode and dynamic response of slopes in seismic loading can provide a theoretical guideline for anti-earthquake design of slopes. In order to investigate the influences of water content of soils on dynamic failure modes and dynamic responses of slopes, the laboratory shaking table tests are conducted. The physical process of failure of slopes with different water contents and the dynamic responses of slopes in earthquake loading are analyzed. The test results show that the water content of soils in slopes has important influences on their failure modes. The sandy slopes with water contents of 6.8% and 10% in the soils have failure modes of shatter-collapse sliding and shatter-breakup sliding respectively. The clay slopes with water contents of 18.1% and 24.6% in the soils have failure modes of shatter-breakup sliding and shatter-creep sliding respectively. The slope with a larger water content of soils is more stable than that with a smaller water content at the range of parameters considered. Under the action of horizontal dynamic load, the variation of displacement of soils at the surface of slope can reflect the characteristics of slope failure. The amplification effect of acceleration for the slope with a larger water content of soils is smaller than that with a smaller water content for the case of sandy soil slope and cohesive slope considered. The mechanism about the influences of water content in the slope on the failure of slopes is explained with the damping of soils.

Key words: water content of soil; slope; failure mode; dynamic response; shaking table test

0 引言

随着中国西部高速铁路、公路的快速发展, 大量边坡出现在铁路、公路两侧, 边坡的稳定性直接影响到路网的运营安全。中国是一个地震多发的国家, 2008年汶川地震发生后, 在地震断裂带沿线引发了大量滑

坡^[1-3], 滑坡毁坏了众多道路设施, 几乎中断了灾区与

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802203); 国家自然科学基金项目(110902112); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682017QY02)

收稿日期: 2016-12-05

*通讯作者(E-mail: yang_tao@home.swjtu.edu.cn)

外界联系的交通道路。地震作用下边坡的稳定性是广大科研工作者关注的热点问题之一, 如何准确认识地震动力作用下边坡的破坏形式及动力响应特征是科研人员需要解决的一大科学问题。关于该问题的研究, 目前已开展了较多卓有成效的工作。关于边坡变形破坏的模型试验研究, 卢坤林等^[4]通过倾斜模型槽试验对凸面边坡在静力作用下的失稳破坏过程进行了分析。刘婧雯等^[5]研究了地震作用下堆积体边坡土体抛出现象及抛出发生的条件, 认为堆积体边坡上的松动块体, 只有在适当的裂隙角度和足够大的垂直地震加速度同时作用下, 才会发生抛出现象。孙志亮等^[6]探讨了堆积体边坡在地震作用下失稳的特征及破坏模式。Wartman 等^[7]采用小型振动台研究了边坡的变形特征, 并与 Newmark 理论解进行了对比分析。对于边坡动力响应, Lin 等^[8]用均质砂土(含水率 5.1%)模型坡研究了正弦波激励下边坡的动力响应, 结果表明加速度幅值小于 0.4g 时, 边坡响应呈现弹性特征, 随着土体非线性特征变得较强时, 边坡土体响应的放大效应较明显。徐光兴等^[9]用碎石土(9%含水率)制作边坡模型, 研究了 EL Centro 波、Kobe 波和通麦人工波作用下边坡的动力响应。陈新民等^[10]对黏性土(含水率 16.5%)边坡进行了振动台模型试验, 采用了 Kobe 波和 EL Centro 波激励。此外, 岩质边坡的地震动力响应规律也受到较多关注^[11-13]。已有研究有益于人们理解边坡破坏过程及响应特性。由于该问题的复杂性, 许多规律和机理尚待进一步揭示。如边坡土体含水率的变化对边坡破坏模式及动力响应的影响, 目前关于此方面研究报道很少。

本文拟开展边坡土体含水率的变化对边坡破坏及动力响应影响的室内模型试验, 分析不同含水率的边坡失稳破坏的物理过程, 以及在地震荷载作用下边坡动力响应规律, 深入理解边坡的失稳特性及机理, 为边坡的抗震设计提供理论依据。

1 试验方案设计

1.1 试验设备

试验在西南交通大学岩土工程试验中心电液压伺服单向地震模拟振动台上进行。该振动台由美国 ANCO 公司 2012 年生产制造, 主要由控制阀、液压动力系统、振动台面和软件系统组成。振动台面尺寸 $3 \times 2\text{ m}$, 振动频率范围 $0.5\sim100\text{ Hz}$, 可施加的最大加速度为 1.5 g , 有效荷载为 20 t , 台面最大位移为 $\pm 10\text{ cm}$, 台面最大速度为 $\pm 1.0\text{ m/s}$ 。

本试验采用净空尺寸为 $2\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (长×

宽 \times 高) 的刚性模型箱, 一侧为钢化玻璃以便观察滑动过程。在边坡模型后端铺设 10 cm 厚的泡沫板层, 以吸收地震波, 减少反射波的影响。

1.2 试验材料及边坡模型制作

试验用模型材料为级配砂土和砂质黏土(砂土含量占 25%)。其中砂土平均粒径 $d_{50}=0.45\text{ mm}$, 属于中砂, 不均匀系数 $C_u=5.25$, 曲率系数 $C_c=0.92$, 土体设置两种含水率分别为 6.8% 和 10%, 含水率 6.8% 的砂土黏聚力为 2.3 kPa , 内摩擦角为 32.5° ; 含水率 10% 的黏聚力为 3.3 kPa , 内摩擦角为 32° , 以便研究含水率的变化对边坡破坏模式及动力响应的影响。砂土粒径级配曲线如图 1 所示。砂质黏土也设置两种含水率分别为 18.1% 和 24.6%, 密度分别为 $1.72, 1.95\text{ g/cm}^3$, 含水率 18.1% 的黏聚力为 30.4 kPa , 内摩擦角为 19° ; 含水率 24.6% 的黏聚力为 18 kPa , 内摩擦角为 10° 。

边坡模型的制作采用分层填土法, 每次填筑 10 cm 高, 在填筑过程中, 用恒定力对土体进行碾压压实以便确保土体孔隙率尽可能均匀分布。边坡填筑完成后, 通过取样测试土体密实度, 发现模型边坡土体处于稍密状态。在填筑过程中, 用白色石英砂在边坡侧面设置竖向观测条带, 以便在试验过程中观测边坡土体的变形。填筑后的边坡如图 2 所示。试验中一共制作了 4 个模型边坡, 分别对应不同含水率的砂土和黏土边坡。

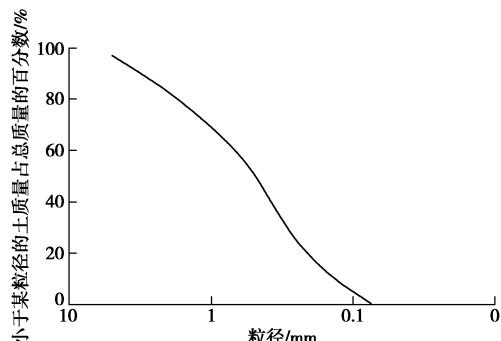


图 1 砂土粒径级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves



图 2 试验边坡模型

Fig. 2 Slope model for tests

1.3 试验量测系统

试验直接测量的参数为边坡表面土体位移和坡体内振动加速度。试验采用高精度非接触式激光位移传感器测量边坡表面位移, 通过测量得到的表面位移经过微分运算可获得表面测点的加速度值。激光位移传感器由德国米依公司生产, 型号为 ILD1402-200 和 ILD1402-100, ILD1402-200 的量程为 20 cm, 测量精度为 0.36 mm, 动态分辨率小于 0.1 mm, 采样频率可达 1000 Hz; ILD1402-100 的量程为 10 cm, 测量精度为 0.18 mm, 动态分辨率在 0.05 mm 以下, 采样频率也为 1 kHz。10 cm 量程的激光位移传感器用于测量坡顶的竖向位移, 20 cm 量程用于测量边坡斜面上的位移。采用美国进口的单轴加速度传感器型号为 Dytan3256A8, 灵敏度为 238 mv/g, 加速度传感器布置在坡体内部, 用于测量坡体内部不同位置的加速度响应。在边坡正面、侧面和顶面均放置高清摄像机全程监控边坡在振动过程中的变形和破坏情况。详细布置位置见图 3 所示。加速度传感器 A0 固定在振动台面上, 加速度传感器 A1-A3 在坡内, 激光位移传感器 D1 在坡顶, D2-D4 在坡面上, D5 测量模型箱体的位移。

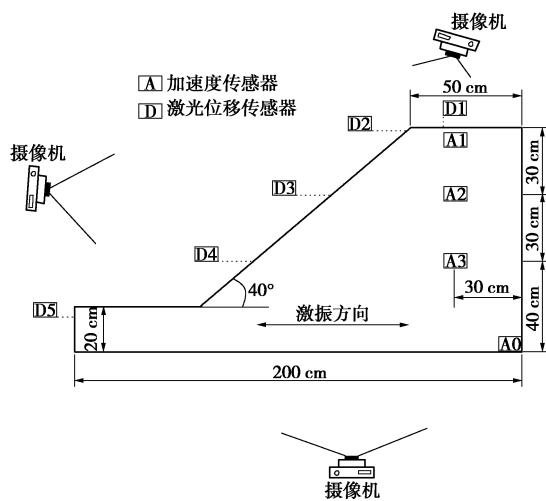


图 3 模型测量布置示意图

Fig. 3 Layout of measuring points in model

1.4 模型边坡加载方式

正弦波具有频率单一、幅值一致的优点, 用其模拟地震荷载的输入, 可以排除其它因素的干扰, 更能抓住主要影响因素, 因此本试验输入的地震波为正弦波, 典型的输入信号如图 4 所示。试验输入波的幅值从小到大逐渐增长, 直到每组边坡出现失稳为止, 输入波的频率固定不变为 3 Hz, 输入波的持时为 12 s。在每次输入各振幅的波之前, 均输入一次微幅白噪声激励, 以便测定边坡模型动力特性的变化, 试验用白噪声幅值为 0.03g, 持时 12 s。

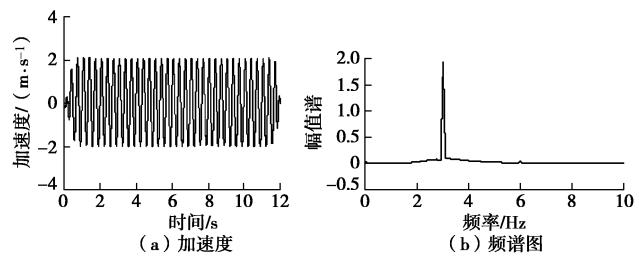


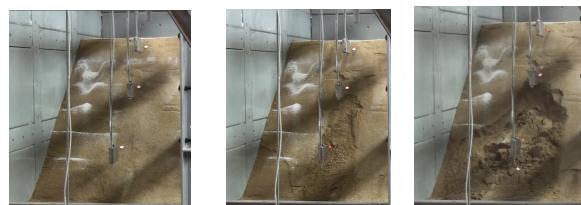
图 4 典型的输入正弦波信号

Fig. 4 Typical sine wave signals for input

2 结果分析与讨论

2.1 边坡破坏特征分析

图 5 给出了含水率 6.8% 的砂土边坡破坏过程。从图 5 中可以看出, 在加速度峰值较小时 (如 0.2g) 边坡几乎未发生变形。随着输入加速度的逐渐增大, 边坡表面开始有少量土体向下滑落。当输入的正弦波峰值达到 0.3g 时, 边坡表面土体发生了明显滑动, 并出现了从上到下逐渐增宽的滑动区, 此时在边坡中下部出现了裂缝 (见图 5 (b))。当正弦波峰值加速度增大到 0.4g 时, 下部裂缝以上土体开始大块脱落 (见图 5 (c)), 随后在短时间内边坡完全失稳破坏。图 5(d)~(f) 给出了边坡的破坏过程, 从图中可以看出, 边坡表面土体脱落持续向上发展, 随后坡肩开裂, 坡面脱落的土体持续向坡脚堆积。坡肩开裂后, 裂缝持续向下发展, 随后坡面土体整体下挫并在坡面下部和坡脚处形成松散堆积体。从坡肩处出露的滑面可以看出 (见图 5 (f)), 滑面表面粗糙, 说明该处的滑面主要由拉裂造成。整个边坡的破坏模式为震裂-溃滑型滑坡。



(a) 输入波幅值 0.2g 时, (b) 输入波幅值 0.3g 时, (c) 输入波幅值 0.4g 初
坡面未变形 浅层滑落, 裂缝出现 初始时刻, 坡面土体开始
脱落下滑

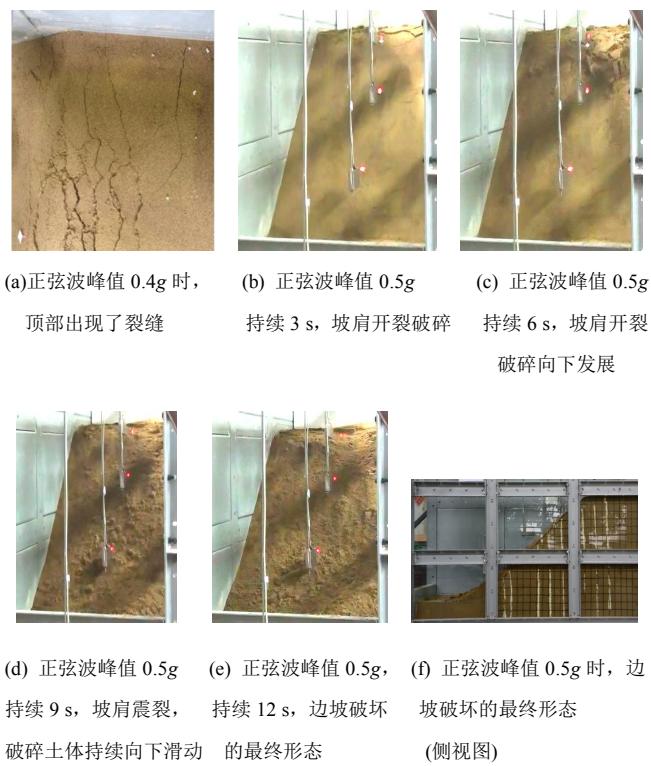


(d) 正弦波峰值 0.4g 持续 3 s 时, 表面土体脱落 (e) 正弦波峰值 0.4g 持续 6 s 时, 坡面土体持续下挫 (f) 正弦波峰值 0.4g 持续 12 s 时, 坡面土体失稳的最终状态

图 5 含水率 6.8% 的砂土边坡在不同加载幅值条件下破坏模式
Fig. 5 Failure modes of sandy slope with water content w of 6.8% under different loading amplitudes

当土体含水率提高到 10% 时, 边坡的破坏模式发生了很大变化, 如图 6 所示。当正弦波输入加速度峰值达到 $0.4g$ 时, 边坡顶面开始产生裂缝, 此时坡面未发生明显变形。当荷载加速度进一步增大到 $0.5g$ 时, 边坡开始发生明显的破坏, 整个过程如图 6(b)~(e) 所示。从图中可见, 首先在坡肩出现了明显的开裂破碎现象, 随后开裂破碎持续向下发展, 破碎后的土体向坡脚滑落, 同时坡肩处的土体持续被震碎并向下滑落散布于整个坡面。在整个过程中, 坡面中下部土体未发生较大变形, 基本保持了最初的状态(见图 6(f))。如继续增大输入加速度峰值到 $0.6g$, 边坡中上部坡体几乎完全破坏并塌陷, 最终形成下部堆积体, 该种破坏形式为震裂-溃散型滑坡。

对比图 5, 6 可知, 土体含水率不同的两个边坡, 它们的破坏形式有较大差异, 含水率较小的边坡表现为震裂-溃滑型滑坡破坏形式, 而含水率较大的表现为震裂-溃散型滑坡破坏形式。此外, 从上述分析可知, 一定含水率范围内, 在外部水平载荷作用下含水率较大的边坡比含水率较小的边坡更稳定, 本文中土体含水率 6.8% 的边坡在正弦波加速度峰值达到 $0.4g$ 时即发生了破坏, 而含水率 10% 的边坡在加速度 $0.4g$ 时仅在坡顶出现了裂缝, 坡面未发生明显变形, 当加速度增大到 $0.5g$ 时坡肩才开始出现明显的破碎现象, 但此时破坏主要在坡体表层出现, 整个坡体的形状未严重变形, 仅当加速度峰值达到 $0.6g$ 时坡体形状才发生了严重变形。

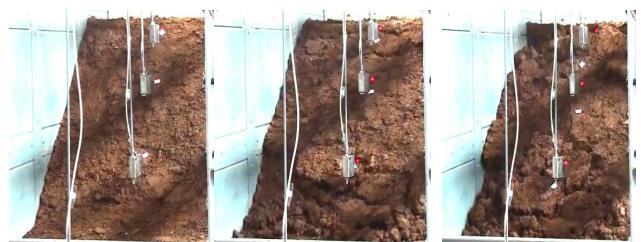


(g) 正弦波峰值 $0.6g$, 边坡最终状态, 顶部崩塌后堆积于坡脚

图 6 含水率 10% 的砂土边坡破坏模式

Fig. 6 Failure modes of sandy slope with water content w of 10%

图 7 给出了含水率 18.1% 的黏土边坡的破坏特征。从图 7 中可看出, 当正弦波加速度峰值为 $0.5g$ 时, 边坡完好无损, 未发生变形(见图 7(a))。当加速度峰值达到 $0.6g$ 时, 边坡发生了溃散型滑坡破坏, 如图 7(b)~(e) 所示。从图 7(b)~(e) 可见, 边坡在发生破坏前期时从坡顶到坡脚几乎同时发生震裂破碎(见图 7(b)), 随后整个坡体持续开裂破碎, 最后坡体几乎完全解体在边坡中下部位置形成松散堆积体。当土体含水率增大到 24.6% 后, 土体的破坏形式发生了较大变化。加速度峰值一直增加到 $0.8g$ 时, 才发生较明显变形, 当加速度达到 $1.0g$ 时, 坡体的状态如图 8 所示, 坡体表面出现了凹凸不平的变形, 同时在表面出现了几条裂缝。从侧视图(图 8(c))可见, 整个坡体结构未发生严重变形, 没有出现溃散或溃滑型滑坡破坏, 该破坏形式可定义为震裂-蠕滑型。对比两种黏性土边坡不同含水率的破坏形态可知, 在外部动荷载作用下含水率较大的黏土边坡(24.6%)比含水率较小(18.1%)的更稳定, 即使在发生动力破坏时含水率较大的黏土边坡也不容易产生坡体的严重溃散或崩塌破坏而是产生逐渐蠕变变形的破坏形态。



(a) 正弦波峰值 $0.5g$ 时, 坡体完好
(b) 正弦波峰值 $0.6g$ 时, 坡体开裂破碎
(c) 正弦波峰值 $0.6g$ 时, 坡体持续开裂



(d) 正弦波峰值 $0.6g$ 时, 坡体溃散
(e) 正弦波峰值 $0.6g$ 时, 坡体溃散

图 7 含水率 18.1% 的黏土边坡破坏模式

Fig. 7 Failure modes of clay slope with water content w of 18.1%

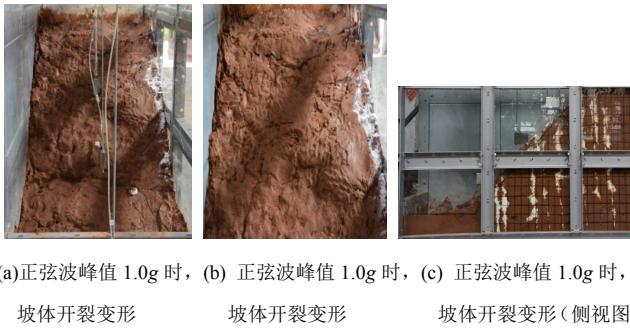


图 8 含水率 24.6% 的黏土边坡破坏模式

Fig. 8 Failure modes of clay slope with water content w of 24.6%

2.2 边坡变形特征分析

从边坡表面位移曲线分析可知, 含水率 6.8% 的砂土边坡在加速度峰值达到 $0.4g$ 时位移发生了突变, 边坡表面中上部测点 (D2, D3) 位移从 $0.3g$ 时的几个毫米变化到 $0.4g$ 时的 90 mm 以上, 位移为正表明土体发生了塌陷, 而边坡表面下部测点 (D4) 发生了约 -78 mm 的位移, 表明该处土体向外运动或发生了堆积, 从图 5 可看出, 在该加速度处由于边坡发生了滑移而在坡脚产生了堆积, 土体向外凸造成了测点 D4 产生了向外的负向位移。分析坡顶测点 D1 的竖向位移 (图 9 (b)) 可知, 在加速度从 $0.2g$ 增加到 $0.4g$ 的过程中, D1 测点的位移逐渐缓慢增大, 在 $0.4g$ 时累积发生了 12.3 mm 的位移, 该位移大小表明此处土体在边坡失稳时未发生滑移, 从图 5 可见, 含水率 6.8% 的砂土边坡在坡肩处开裂, 该结果与图 5 观察到的现象正好吻合。

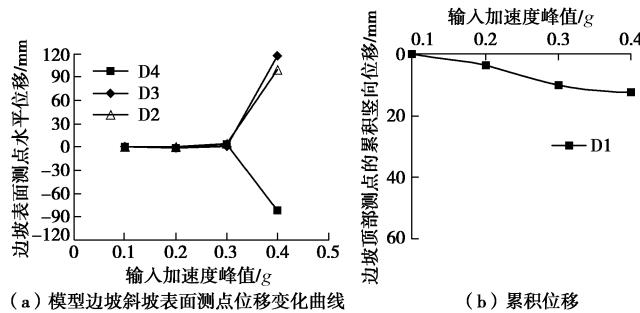


图 9 模型边坡表面位移变化曲线 (砂土含水率 6.8%)

Fig. 9 Variation of displacement at surface of slope (water content of sand of 6.8%)

图 10 给出了含水率 10% 的砂土边坡表面测点的位移变化曲线, 与含水率 6.8% 的边坡位移曲线有明显差异, 含水率 10% 的砂土边坡表面 D2、D3、D4 测点位移彼此各不相同, D2 产生了 19 mm 的正向位移, D3 产生了 -5.3 mm 的负向位移, D4 产生了 -37.6 mm 的负向位移, 表明 D2 处土体发生了塌陷, D3 处土体发生了轻微堆积, D4 处土体发生了较大体积堆积。而顶部测点 D1 处土体 (图 10 (b)) 在 $0.4g$ 以前的累积

位移仅为 8.8 mm, 在 $0.5g$ 时发生了 21 mm 的较大竖向位移, 说明此时该处土体发生了较大的沉陷变形。当加速度增大到 $0.6g$ 时, 边坡表面所有测点的位移变化均超过了激光位移传感器的量程范围, 说明此时边坡各位置均发生了严重变形。由前面分析可知, 该边坡属于震裂-溃散型破坏形式, 图 10 的位移曲线正好反映了该类型边坡破坏形式的特点。

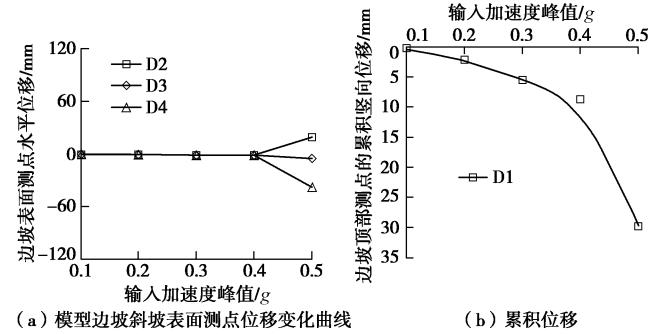


图 10 模型边坡表面位移变化曲线 (砂土含水率 10%)

Fig. 10 Variation of displacement at surface of slope (water content of sand of 10%)

图 11 给出了含水率 18.1% 的黏土边坡表面各测点位移变化曲线。从图中可看出, 加速度峰值在 $0.1g$ ~ $0.5g$ 时坡面位移变化很小, 坡顶 D1 测点处的累积位移也仅为 5.5 mm, 表明此时边坡是稳定的。当加速度增大到 $0.6g$ 时, 坡面测点 D2、D3、D4 处的土体位移出现了大幅增长, D2、D3 测点处土体位移分别增大了 23 mm 和 45 mm, D4 测点处土体位移变化了 -98 mm, 坡顶 D1 处土体位移增大了 7 mm, 可见此时边坡发生了严重的变形, 此与图 6 观察到的边坡震裂-溃散破坏现象一致。

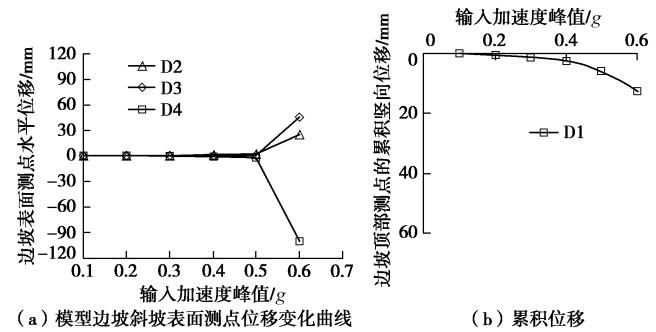


图 11 模型边坡表面位移变化曲线 (黏土含水率 18.1%)

Fig. 11 Variation of displacement at surface of slope (water content of clay of 18.1%)

含水率 24.6% 的黏土边坡表面位移曲线如图 12 所示。与含水率 18.1% 的黏土边坡不同, 该边坡在加速度峰值达到 $0.7g$ 时整个边坡表面位移均很小, 也即整个边坡的变形很小, 处于稳定状态。加速度峰值增大到 $0.8g$ 时边坡表面出现了位移, $0.9g$ 时表面位移进一

步加大, 1.0g 时表面各点出现了较大变形, 此时 D2、D3、D4 各点位移分别变化了 -15, -35, -76 mm, D1 测点处土体变化了 35 mm, 从边坡表面 D2、D3、D4 点处位移变化可知, 3 个测点处土体位移均为负值, 说明边坡表面从上到下各点土体均向坡面外运动, 坡顶土体向下挫动, 可推测边坡破坏形式为坡面向外凸的破坏模式, 这与图 8 观测到的结果是吻合的。对比黏土边坡两种含水率的变形破坏模式可知, 在一定范围内, 含水率的变化对边坡的稳定性和破坏形态有较大影响, 含水率越大, 边坡越稳定且边坡最终破坏形式趋向于蠕滑型破坏。

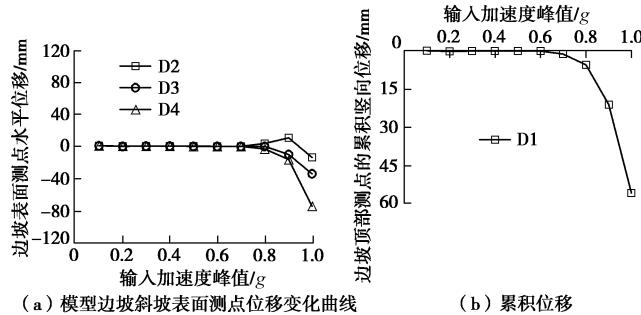


图 12 模型边坡表面位移变化曲线 (黏土含水率 24.6%)

Fig. 12 Variation of displacement at surface of slope (water content of clay of 24.6%)

2.3 边坡动力响应特性分析

图 13 (a) 给出了砂土边坡两种含水率 (6.8% 和 10%) 条件下坡内测点的加速度响应特性。从图中可看出, 在正弦波动力荷载激励下, 激励的加速度峰值较小时 (如小于等于 0.2g), 整个边坡的加速度放大效应较弱, 加速度放大系数基本在 1.05 以下变化, 当激励加速度峰值达到 0.3g 和 0.4g 时, 在边坡中上部存在明显的放大效应, 尤其在 0.7H 高度处, 放大效应最强, 放大系数的最大值达到 1.85 左右; 而在边坡中下部 (0.4H 以下) 边坡的加速度放大效应仍不够明显。对比两种含水率边坡的加速度放大效应可知, 在同样条件下, 含水率 10% 的砂土边坡的加速度放大效应小于含水率 6.8% 的边坡。图 13 (b) 给出了砂土边坡两种含水率 (6.8% 和 10%) 条件下坡面测点的加速度响应特性。从图中可看出, 在坡面测点处, 含水率 6.8% 的砂土边坡的加速度放大效应略大于含水率 10% 的砂土边坡。

图 14 给出了含水率 18.1% 和 24.6% 的两种黏土边坡的加速度放大响应特性。从图 14 (a) 可见, 与砂土边坡响应类似, 当激励加速度峰值较小 (本文中小于等于 0.2g) 时, 沿边坡高程范围内加速度放大效应微弱, 对于所有激励峰值在边坡中下部位置处加速度放大效应也不明显; 仅当激励加速度峰值大于 0.2g 以后 (如 0.3g~0.6g) 在边坡中上部位置加速度有明显

的放大效应, 在 0.7H 处放大系数达到最大值。而从边坡表面的放大效应看 (见图 14 (b)), 沿高程增加加速度放大系数呈缓慢增长趋势。综合坡内、坡面两种含水率边坡的加速度响应特性可知, 含水率为 24.6% 的边坡加速度放大效应弱于含水率 18.1% 的黏土边坡。

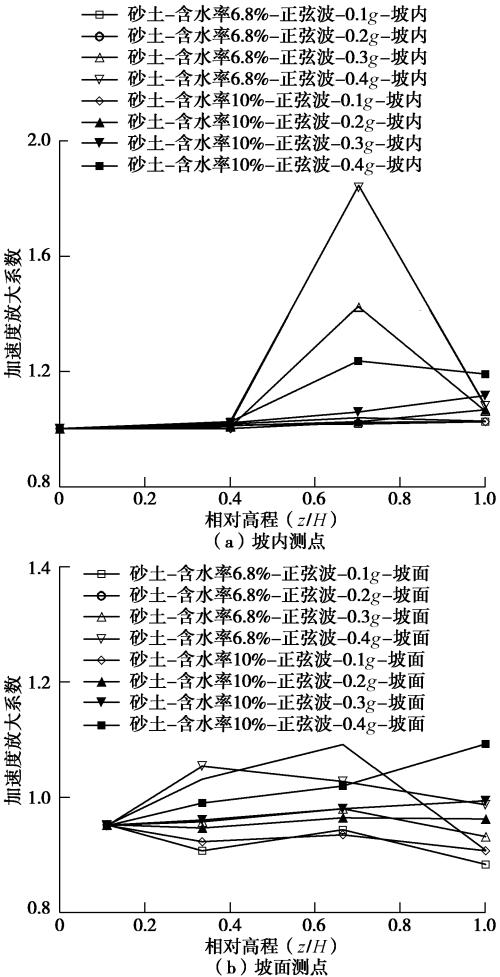
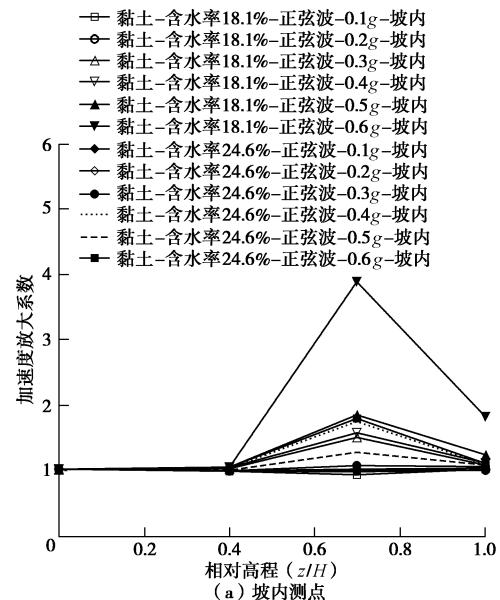


图 13 正弦波作用下边坡加速度放大系数随高程的变化关系

Fig. 13 Variation of acceleration amplification factor with slope elevation under sine wave load



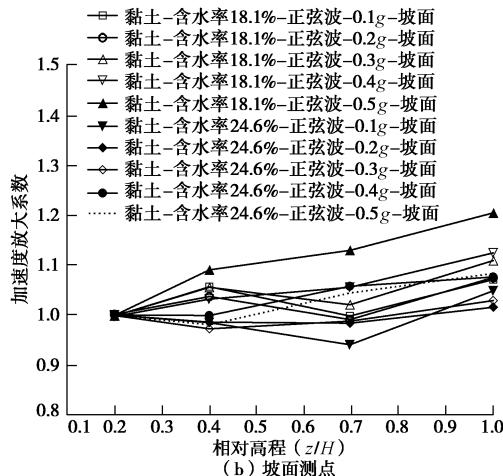


图 14 正弦波作用下边坡加速度放大系数随高程的变化关系

Fig. 14 Variation of acceleration amplification factor with slope elevation under sine wave load

2.4 机理分析

从以上分析可见, 在动力荷载作用下, 边坡土体含水率越大, 边坡反而不容易破坏。原因有多方面。对于砂土而言, 在砂土饱和之前, 含水率的增加造成了砂土表观黏聚力一定程度的增大, 从而使含水率大的砂土边坡可能更为稳定。而对于黏土边坡, 已有研究^[14-17]和本文土体力学性质参数证明随着土体含水率的增加, 土体的抗剪强度指标 c 和 φ 总体上呈下降趋势, 表明在静止状态下随着土体含水率的增加边坡稳定性程度呈减弱趋势。

另一方面, 根据土动力学研究结果^[18-19]表明土体的循环剪应变增大, 土体的阻尼比增大, 也就是说在同样条件下土体在外部循环动荷载作用下土体内部产生的剪应变越大, 土体耗散能量越多。随着土体含水率增大, 土体的强度减弱, 变形能力增强。在同样的外部循环荷载作用下, 含水率大的土体循环剪应变较大, 相应的土体阻尼比也会较大, 则其耗散的能量也越多。申权^[20]用不同含水率的砂土和粉质黏土进行了阻尼比变化的实验, 研究表明粉质黏土和砂土的阻尼比随含水率的增加而增大(如图 15, 16)。赵淑萍等^[21]对粉质黏土和细砂的冻土进行阻尼比研究, 试验发现冻土的阻尼比随含水率增加呈增大趋势。张向东等^[22]对辽西地区冻风积土进行了动三轴试验, 研究表明冻土的阻尼比随着含水率的增加而增大。

土体含水率增大后, 虽然黏土土体的强度减弱了, 但在动力荷载作用下, 其阻尼比增大造成的能力衰减可能超过土体强度减弱对边坡稳定性的影响。从而出现了本文试验中的现象, 在正弦波循环动力荷载作用下含水率越大的边坡越不容易发生动力破坏且坡体内加速度放大效应弱于含水率小的边坡。

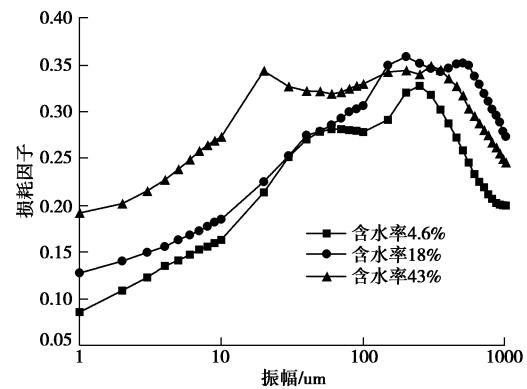


图 15 含水率变化对土的阻尼参数的影响(土样为粉质黏土)
(引自文献[19])

Fig. 15 Influences of water content on damp of soils (silty clay)
(from Reference [19])

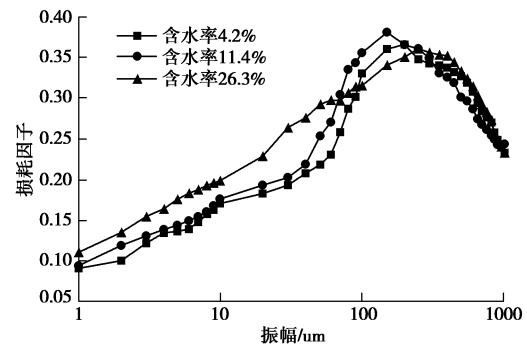


图 16 含水率变化对土的阻尼参数的影响(土样为砂土)
(引自文献[19])

Fig. 16 Influences of water content on damp of soils (sand) (from Reference [19])

关于加载波频率与边坡模型自振频率间的相互作用本文认为对结果影响不大, 原因在于本实验模型的自振频率在 20 Hz 左右, 而加载波的频率始终在 3 Hz, 二者相差较远。

3 结论与建议

(1) 土体含水率对边坡的破坏模式有较大影响, 对边坡加速度放大效应有一定程度影响。

(2) 在一定条件范围内, 正弦波荷载作用下含水率大的边坡比含水率小的边坡更稳定, 含水率大的边坡加速度放大效应弱于含水率小的边坡。含水率不一样的边坡失稳时可能存在完全不一样的破坏模式。

(3) 在动力荷载作用下, 边坡表面的位移变化特征能反映边坡破坏模式的相关信息。

(4) 当激励加速度峰值较小(本文中小于等于 $0.2g$)时, 沿边坡高程范围内加速度放大效应微弱; 对于所有激励峰值, 在边坡中下部位置处加速度放大

效应不明显；仅当激励加速度峰值大于 $0.2g$ 以后（如 $0.3g \sim 0.6g$ ）在边坡中上部位置加速度有明显的放大效应。

由于该问题的复杂性，以上结论的可靠性尚需今后进一步深入分析和验证。

参考文献：

- [1] 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. (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. (in Chinese))
- [2] 宋胜武. 汶川大地震工程震害调查分析与研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (SONG Sheng-wu. Investigation analysis and research on Engineering harzads in Wenchuan Earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 李秀珍, 孔纪名. “5·12”汶川地震诱发典型滑坡的类型和特征[J]. 山地学报, 2011, 29(5): 598 – 607. (LI Xiu-zhen, KONG Ji-ming. Types and characteristics of typical landslides triggered by “5·12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(5): 598 – 607. (in Chinese))
- [4] 卢坤林, 朱大勇, 杨 扬. 边坡失稳过程模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 778 – 782. (LU Kun-lin, ZHU Da-yong, YANG Yang. Model test study of slope failure progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 778 – 782. (in Chinese))
- [5] 刘婧雯, 黄 博, 邓 辉, 等. 地震作用下堆积体边坡振动台模型试验及抛出现象分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 307 – 311. (LIU Jing-wen, HUANG Bo, DENG Hui, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 307 – 311. (in Chinese))
- [6] 孙志亮, 孔令伟, 郭爱国, 等. 地震作用下堆积体边坡的坡面变形与失稳机制[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3465 – 3472. (SUN Zhi-liang, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Surface deformations and failure mechanisms of deposit slope under seismic excitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3465 – 3472. (in Chinese))
- [7] WARTMAN J, SEED R B, BRAY J D. Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 610 – 622.
- [8] LIN M L, WANG K L. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test[J]. Engineering Geology, 2006, 86(2): 118 – 133.
- [9] 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(3): 624 – 632. (XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, 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(3): 624 – 632. (in Chinese))
- [10] 陈新民, 沈 建, 魏 平, 等. 下蜀土边坡地震稳定性的大型振动台试验研究(II)——试验结果及分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(6): 587 – 594. (CHEN Xin-min, SHEN Jian, WEI Ping, et al. Large-scale shanking table test of seismic stability of Xiashu Loess slope: analysis of test results(2)[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(6): 587 – 594. (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 – 2982. (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 – 2982. (in Chinese))
- [12] 李振生, 巨能攀, 侯伟龙, 等. 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 242 – 247. (LI Zhen-sheng, JU Neng-pan, HOU Wei-long, et al. Large-scale shaking table model tests for dynamic response of steep stratified rock slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 242 – 247. (in Chinese))
- [13] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变性破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696 – 702. (YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, DONG Jin-yu, et al. Study of dynamic response characters and failure mechanism of rock slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 696 – 702. (in Chinese))
- [14] 赵慧丽, 张 弥, 李兆平. 含水率对北京地区非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2001, 14(4): 30 – 33. (ZHAO Hui-li, ZHANG Mi, LI Zhao-ping. The study of water content influence on unsaturated soil shear strength by test[J]. Journal of Shijiazhuang and Railway Institute, 2001, 14(4): 30 – 33. (in Chinese))

(下转第 725 页)