

DOI: 10.11779/CJGE201807015

地震和降雨耦合作用下黄土边坡动力响应的振动台试验研究

王兰民^{1,2}, 蒲小武^{*1}, 吴志坚^{1,2}, 徐舜华^{1,2}, 刘琨^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2013年岷漳 Ms6.6级地震诱发的永光村泥石流滑坡表明, 单一因素下稳定的黄土边坡在地震和降雨耦合作用下会诱发严重的岩土灾害。因此, 基于防御与减轻地震灾害的现实需求, 开展了地震和降雨耦合作用下黄土边坡振动台模型试验, 通过加载卓越频率差异较大的原始波和压缩波, 研究了地震和降雨耦合作用下黄土边坡的动力响应特征。试验结果表明: 边坡动力作用过程, 土体微结构不断损伤演化, 土体动力参数——共振频率与阻尼比随动载强度增大不断调整变化, 从而引起边坡不同部位加速度响应特征(频谱、幅度)的变化。PGA放大效应取决于边坡自振频率与荷载主频接近程度, 当二者愈接近, 放大效应越明显, 反之放大效应越弱甚至响应衰减(放大系数小于1)。根据边坡模型宏观变形以及相关物理量的变化特征, 地震和降雨耦合作用下的边坡失稳破坏过程可划分为: 弹性动变形阶段、残余变形快速增加阶段、液化滑移阶段, 不同阶段边坡动力响应各具特点。

关键词: 黄土边坡; 动力响应; 振动台; 模型试验; 耦合

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)07-1287-07

作者简介: 王兰民(1960-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土动力学与岩土地震工程。E-mail: wanglm@gsdzj.gov.cn。

Shaking table tests on dynamic response of loess slopes under coupling effects of earthquakes and rainfalls

WANG Lan-min^{1,2}, PU Xiao-wu¹, WU Zhi-jian^{1,2}, XU Shun-hua^{1,2}, LIU Kun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The muddy loess landslide in Yongguang village induced by the Minxian-Zhangxian Ms 6.6 earthquake shows that the loess slope being stable under the action of single factor will induce severe disaster under the coupling effects of earthquakes and rainfalls. Therefore, based on the realistic demand of defense and mitigation of earthquake disasters, the shake table model tests on loess slopes under the coupling effects of earthquakes and rainfalls are carried out to study their dynamic response characteristics. The test results show that the dynamic process of slopes is the process of continuous damage of loess microstructure, and the natural frequency and the damping ratio of soil mass continuously change with the increase of load intensity so as to cause the changes of the acceleration response characteristics (spectrum and amplitude) of different parts of the slopes. The PGA amplification effect of loess slopes depends on the close extent of natural frequency of slopes and load frequency. When the two are closer, the amplification effect is more obvious. On the contrary, the amplification effect is weakened and even is reduced (The amplification factor is less than 1). According to the macroscopic deformation and related physical changes, the instability failure process of slopes under the coupling effects of earthquakes and rainfalls can be divided into the following stages: elastic dynamic deformation stage, rapidly increasing residual deformation stage and liquefaction sliding stage, and the dynamic response of slopes at different stages has its own characteristics.

Key words: loess slope; dynamic response; shaking table; model test; coupling

0 引言

滑坡历来是黄土区最突出的岩土灾害之一, 其主要的天然诱发因素有地震和降雨两种。由于成因机制

完全不同, 因此对于二者诱发黄土滑坡的研究常常单

收稿日期: 2017-04-12

*通讯作者 (E-mail: wdpuwx@163.com)

独开展。鉴于黄土区干旱、半干旱的气候特点及地震事件的小概率性,二者在持时方面的巨大差异使得有限时空内耦合诱发滑坡的概率很低,因此似乎研究二者耦合诱发的滑坡没有必要。但2013年甘肃岷漳Ms6.6级地震诱发的永光村泥流状黄土滑坡却为这一貌似正确的认识付出了惨痛的生命代价。该次地震前,当地出现了持续约一周的降雨,地震发生后,立即诱发大量黄土滑坡,其中永光村泥流状黄土滑坡造成了14户人家被掩埋,12人死亡惨剧的发生;而2008汶川地震时在当地响应的PGA与岷漳地震基本一致,却鲜有滑坡事件的发生^[1-2]。由此可见当地震和降雨有耦合作用时,单一因素下稳定的黄土边坡也可能诱发滑坡灾害。因此基于防御与减轻地震岩土灾害的现实需求,地震和降雨耦合作用下黄土滑坡的科学研究不仅完全必要而且十分紧迫。

中国有世界上分布最为广泛的黄土覆盖区,该区域地形地貌复杂,地震活动强烈。大量的震后调查资料显示,黄土区地震岩土灾害较之非黄土区有普遍加重的特点^[3]。因此,揭示地震与降雨及场地特性等内外因素耦合作用下边坡动力响应规律就成为厘定边坡失稳机理、稳定性评价预测等相关震灾防御工作的前提和基础。现有关于黄土边坡动力响应的研究手段主要包括现场实地监测、震后调查统计、数值计算与物理模拟等四个方面。由于相对于科学研究而言地震资源的稀缺性,以及多种现实客观因素的制约,大量的黄土边坡动力稳定性研究工作基于数值模拟有限元方法来开展^[4]。由于黄土是具有特殊微结构的碎散多孔多相颗粒介质,在不同的初始应力状态及荷载强度下,有着不同的力学性状及破坏模式。动荷作用下,土体固水气三相介质应力、应变不断调整耦合,微结构不断损伤演化,残余变形不断累计,使得土体宏观力学性状不断劣化^[5];而有限元方法不能模拟黄土微结构的这一动态劣化演变过程,其结果的合理性需通过试验进一步验证,因此振动台模型试验逐渐成为边坡稳定性研究的重要手段^[6]。基于此,本文以振动台模型试验为基础,开展了地震和降雨耦合作用下黄土黄土边坡动力响应规律的研究工作。

1 边坡模型振动台试验

根据试验目的与现实客观条件,选定了兰州丘陵沟壑区一坡高7m,坡度20°,Q₃纯马兰黄土边坡为原型建立概化模型(图1)。

试验设备为兰州地震研究所一大型振动台(4m×6m),可加载频率范围0.1~70Hz,最大加速度达1.7g。试验中使用了一长宽高为3m×1.5m×1.2m

刚性模型箱为边坡模型容器,根据原型及模型箱大小,确定几何相似比为10:1,材料参数相似比通过林皋等^[8]的相似方法确定。

由于黄土是具有微结构的一种特殊土类,颗粒成分是其结构性的主要内因之一,故而考虑以原型场地重塑黄土为模型材料,这样在保证密度、粘聚力基本相似的条件还能保证模型土体具有一定的结构性及结构强度^[7]。通过不同含水率条件下的重塑黄土三轴试验,以原、模型密度基本一致为必要条件,最终确定在含水率为6%的情况下,模型试验值与目标值基本接近,相关参数见表1。

表1 土体参数及相似值

物理量	w/%	$\rho/(10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
相似比	1	1	10	1
实际值	4.1~5.6	1.31~1.34	43.2~50.2	35~37
目标值	4.1~5.6	1.31~1.34	4.3~5	35~37
试验值	6	1.32	9	33

沿振动方向,模型箱两1.5m钢板内侧放置了2cm塑料泡沫板以减少边界效应的影响。模型制作过程中,首先将原状黄土碾碎,过0.5mm筛后配水,拌匀后铺设于模型箱,10cm一层,分层铺设并压实。沿模型中心剖面布设15个加速度传感器,坡顶面、斜坡面垂直向下5cm处分别布设5个孔压及土压力传感器(图1)。模型制作完成后,通过自主设计的人工降雨设备实施人工降雨。降雨量参考了兰州历史上近50a最强的一次降雨过程,设计总雨量为100mm,雨强20mm/h。降雨完成后边坡模型静置0.5h实施振动台试验。

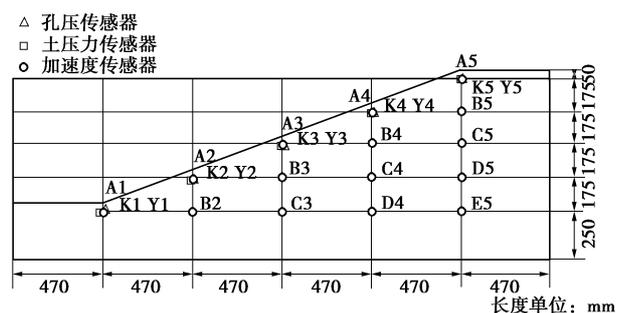


图1 边坡模型几何尺寸与传感器布设位置

Fig. 1 Sizes of slope model and position of sensors

边坡的动力变形及失稳破坏主要是由下方基岩垂直上传播的剪切波引起。因此在本次试验过程中输入了2013年岷漳地震时岷县台NS向加速度时程原始波及压缩波,原始波卓越频率4.2, 8.3 Hz也有很强的能量分布(图2);压缩波卓越频率23 Hz,与降雨后边坡模型一阶自振频率基本接近。人工降雨完毕后逐级加载100, 200, 300, 400, 600, 650 gal (1 gal=0.01

m/s²) 岷县原始波及压缩波。

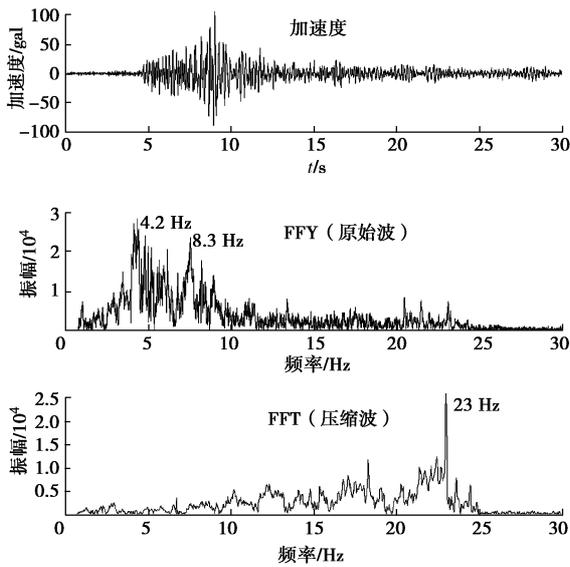


图 2 加载波形时程及 FFT

Fig. 2 Time history and FFT of loading wave

2 边坡模型动力参数计算方法

边坡模型可将其简化为如图 3 所示的直角梯形截面, 在水平向地震动作用下, 土体骨架受下方土体水平向剪力驱动产生相对运动, 设 x 方向 y 处位移为 $u(y, t)$, 则有阻尼边坡运动基本方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{y/n+M} \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{C}{\rho} \frac{\partial u}{\partial t} = -\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中 n 为坡比; M 为坡顶长度; C 为土体阻尼系数; G 为土体剪切模量; ρ 为土体密度。此偏微分方程解析式为

$$u(y, t) = \sum_{k=1}^n \Phi_k(y) q_k(t) \quad (2)$$

即位移为 n 阶振型函数 Φ 与相应广义坐标 q 乘积的和, 第 k 阶振型方程为

$$\frac{\partial^2 q_k}{\partial t^2} + 2\lambda_k \omega_k \frac{\partial q_k}{\partial t} + \omega_k q_k = -m_k \ddot{u}_g \quad (3)$$

式中, m_k 为振型参与系数, λ_k , ω_k 为 k 阶振型阻尼比及自振频率。

由式 (3) 可见, 边坡模型的自振频率与阻尼比是反映边坡动力特性两个极其重要的物理量。而振动台模型试验, 可通过边坡响应的相对加速度传递函数频谱 (TSF) 来计算模型动力参数^[9], 表达式为

$$H_a(\omega, h_j) = \frac{G_{xy}(\omega, h_j)}{G_{xx}(\omega)} \quad (4)$$

式中, h_j 为 j 点距离台面高度, $G_{xy}(\omega)$ 为输入时程的自功率谱, $G_{xy}(\omega, h_j)$ 为 j 点相对加速度传递函数与输入时程的互功率谱。传递函数还可以表示为各阶振型的

组合形式:

$$H_a(\omega, h_j) = \sum_{k=1}^n \frac{\Phi_k m_k \omega^2}{(\omega_k^2 - \omega^2) - 2i\lambda_k \omega_k \omega} \quad (5)$$

式中, i 为复数虚部, ω 输入波圆频率, 当发生 k 阶共振时, 其它振型不参与响应, 此时 TSF 频谱曲线最大峰值点频率为边坡模型一阶自振频率, 相应的阻尼比为

$$\lambda = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0} \quad (6)$$

式中, ω_0 峰值点频率, ω_2 , ω_1 为峰值 0.707 倍对应的两个频率。

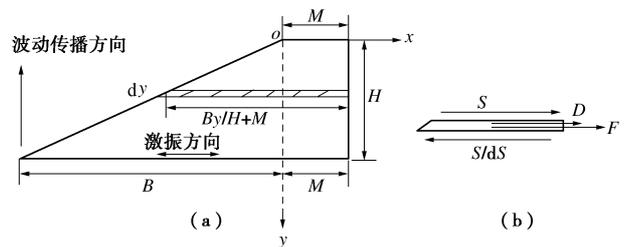


图 3 地震动传播过程中边坡土体受力示意图

Fig. 3 Illustration of force in the process of ground motion propagation

3 试验结果分析

降雨后的边坡模型, 坡顶区域渗透深度平均约 35 cm, 含水率为 26%~19%。斜坡面渗透深度为 25 cm, 含水率为 23%~17%。整个边坡表面无裂隙、湿陷等破坏现象。

3.1 宏观现象

地震动强度在 200 gal 以内时, 没有明显的动残余变形现象。300 gal 坡肩附近出现数条细小裂隙。400 gal 坡顶平台中部出现 1~2 cm 的下陷, 并出现 2 条的纵向裂隙 (图 4 (b))。地震动强度在 600 gal 时, 坡顶中部出现大面积震陷, 下陷量约 5 cm; 坡肩中部位移标记点出现 9 cm 滑移 (图 4 (c)), 表明边坡模型失稳破坏。地震动强度在 650 gal 时, 滑体前缘再次滑动, 滑动量达 20 cm (图 4 (d))。

3.2 边坡土体动力特性变化特征

通过坡顶 A5 点、坡脚 A2 点、坡内 E5 点 (位置见图 1) 响应的相对加速度传递函数计算边坡模型土体动力参数。

由图 5 可以看出, 边坡不同部位自振频率差异较大, 边坡下部相对上部自振频率更高; 坡内相对表层自振频率更高、响应频谱范围更广。随动荷强度增大 TFS 峰值呈非线性下降变化 (图 5 (d))。当边坡出现失稳破坏后 (≥ 600 gal), TFS 峰值呈弥散态, 坡顶

A5 点 TFS 均值接近于 2，而坡脚 A2、坡内 E5 点均低于 2。由此可见，TFS 下降并接近于 2 可作为边坡模型的失稳判据之一。由 A2 点 TFS 最大值与动荷强度 a_g 拟合可得以下公式：

$$TFS_{max} = -22.25a_g^2 - 12.225a_g + 12.453 \quad (7)$$

由于模型试验中加载地震动强度离散度较大，因此试验中的模型失稳加速度可能会高于模型实际的临界失稳加速度，故取 TFS_{max} 为 2，由式 (7) 得出模型失稳时动荷强度为 460 gal，而非 600 gal。

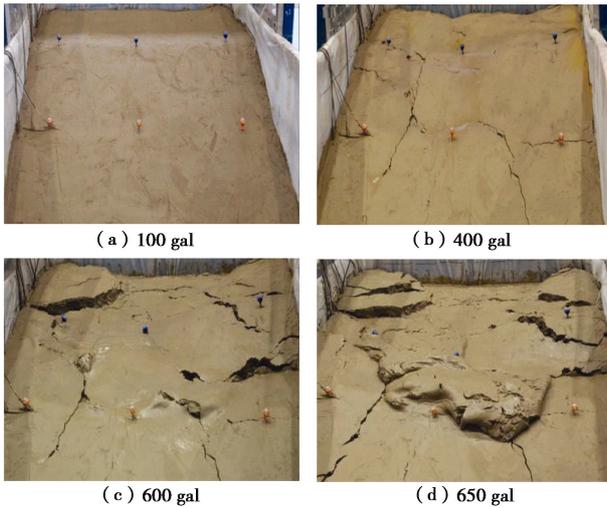


图 4 边坡模型宏观变形及破坏

Fig. 4 Macro-deformation and failure of slope model

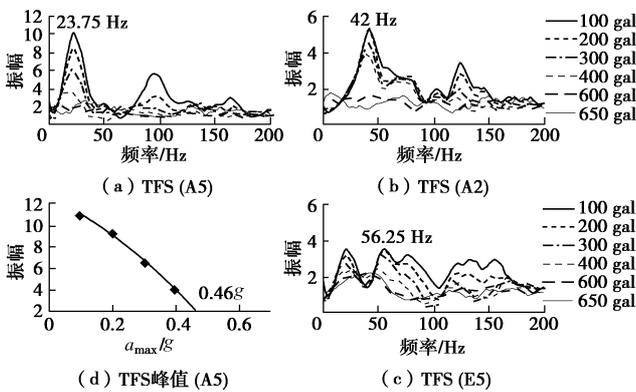


图 5 传递函数频谱 (TFS) 变化特征

Fig. 5 Change characteristics of transfer function spectra ratio with load intensity

以 100 gal 工况对应自振频率 f_0 为基准，将模型不同部位一阶自振频率 f 归一化处理。如图 6 所示，随动荷强度增大，土体微结构不断损伤，阻尼比增大，不同部位土体自振频率都出现不同程度的下降变化，且随荷载强度增大出现非线性减小变化，坡顶浸湿区 A5 点下降速率更快。从图 6 可以看出，边坡土体动力参数——自振频率与阻尼比有 3 个阶段性特点：第一阶段小幅变化，第二阶段快速变化，第三阶段边坡坡

顶 TFS 幅值呈弥散态，无法获得自振频率及阻尼比；坡内 E5 点 TFS 仍具有一定的优势频率，20~50 Hz 有较高的动力响应。

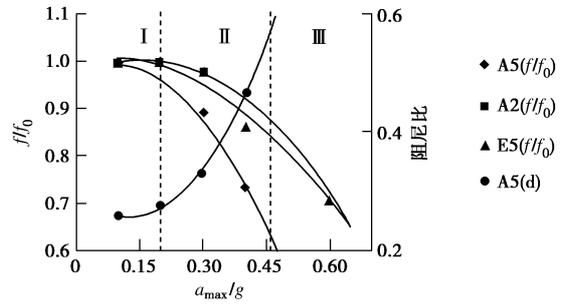


图 6 自振频率及阻尼比随荷载强度的变化特征

Fig. 6 Change characteristics of natural frequency and damping

3.3 PGA 放大效应

大量现场监测与试验结果表明，黄土场地在震动作用下会出现放大效应^[10-11]。现有的研究结果揭示，黄土地震放大效应除与黄土区特殊的地形地貌、土层结构以及黄土力学性质（内因）密切相关外，还与地震动的幅度、频谱、持时（外因）密切相关。

由图 7 可以看出，对于卓越频率（4.2 Hz）远低于边坡模型自振频率的原始波，当加载强度较小时，PGA 放大效应不太显著；但随强度增大，土体微结构

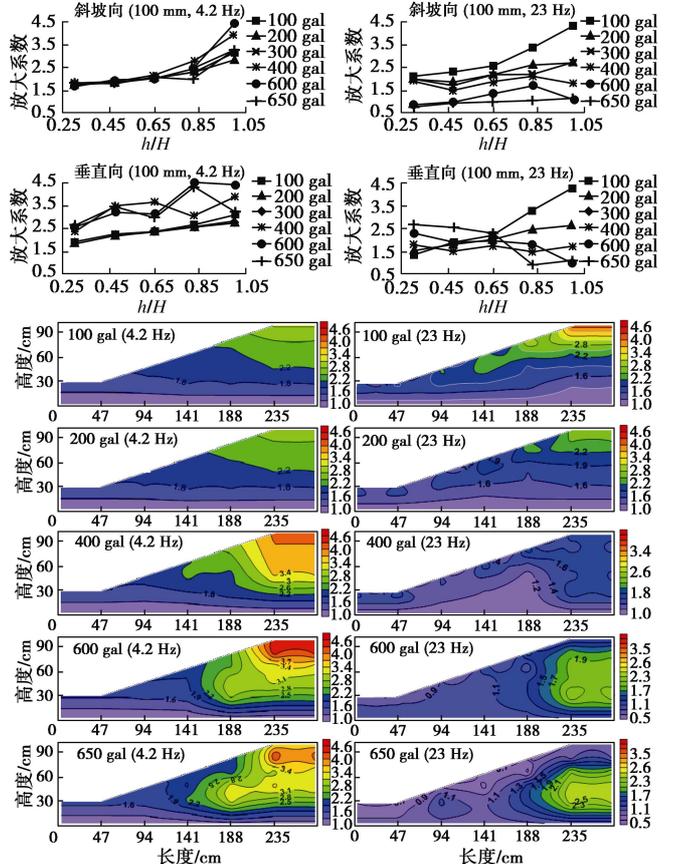


图 7 PGA 放大系数随荷载强度的变化

Fig. 7 Change of PGA amplification coefficient with load intensity

不断损伤且累计, 不同部位土体自振频率不断降低且趋近于荷载主频, 出现 PGA 放大效应不断增强现象, 坡顶区域最为显著。

对于卓越频率 23 Hz 的压缩波, 当动荷强度较小时, 坡顶区域自振频率和荷载主频基本一致, 所以出现很强的 PGA 放大现象。但随着荷载强度增大, 边坡表层雨水浸湿土体微结构损伤加剧, 自振频率不断向低频方向移动, 逐渐偏离荷载主频, 放大系数不断降低。400 gal 后表层雨水浸湿部位甚至出现 PGA 放大系数缩小 (低于 1) 现象, 而中间干区土体微结构损伤演变过程中, 自振频率则不断靠近荷载主频, 因此仍有较强的 PGA 放大效应。

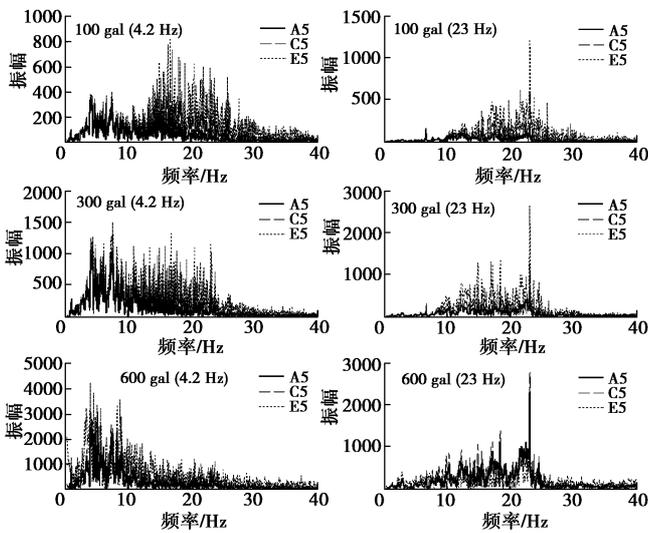


图 8 边坡不同部位加速度傅里叶谱随荷载强度的变化

Fig. 8 Variation of acceleration Fourier spectra of different parts of slope with load intensity

3.4 加速度频谱响应特征

边坡在地震动荷载作用下的响应有稳态响应项和瞬态响应项, 稳态响应由输入荷载特性 (外因) 决定, 瞬态响应取决于边坡动力特性——自振频率及阻尼比等 (内因)。由图 8, 9 可以看到, 降雨后边坡在低于其自振频率的动荷载 (4.2 Hz) 作用下, 小动荷阶段边坡中上部位加速度频谱在涵盖自振频率的 13~24 Hz 频段会有很强能量分布, 即加速度瞬态响应很强。随着荷载强度增大, 土体微结构不断损伤, 边坡自振频率向低频方向偏移, 高频瞬态响应逐渐减弱并向低频端移动。在模型失稳的 600 gal 工况, 不同部位响应的加速度频谱能量主要集中于荷载主频附近, 即稳态响应占主导地位。

加载压缩波时, 小动荷阶段边坡中上部位加速度频谱能量主要分布于 13~24 Hz, 随荷载强度增大, 边坡自振频率不断降低, 坡顶区域偏离荷载卓越频率而边坡中下部位则逐渐接近荷载卓越频率, 因而出现顶部加速度频谱逐渐减弱而中下部位逐渐增强的现象。

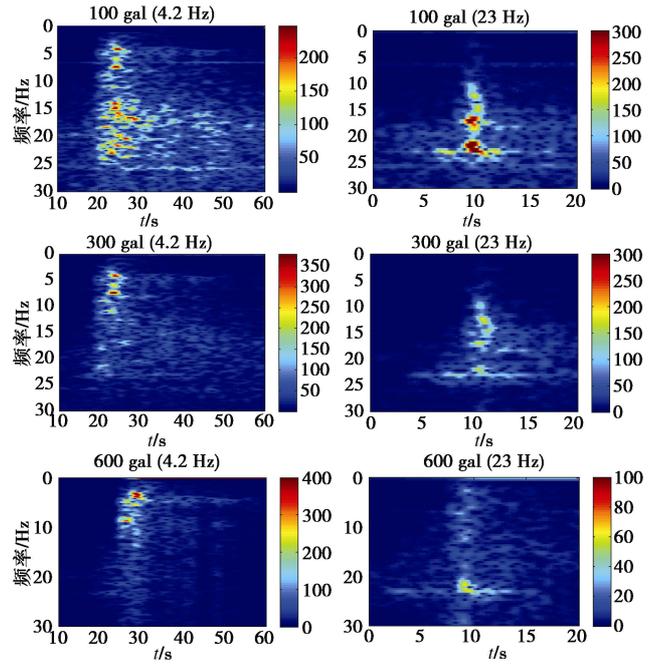


图 9 坡顶 A5 点短时傅里叶频谱

Fig. 9 Short-time Fourier spectra of A5 on slope top

3.5 加速度、孔压、土压力时程变化特征

当动荷强度小于 400 gal 时, 不同部位土压力、孔压呈起伏波动变化。

由图 10 可以看到, 400 gal 时坡肩孔压在 T0~T1

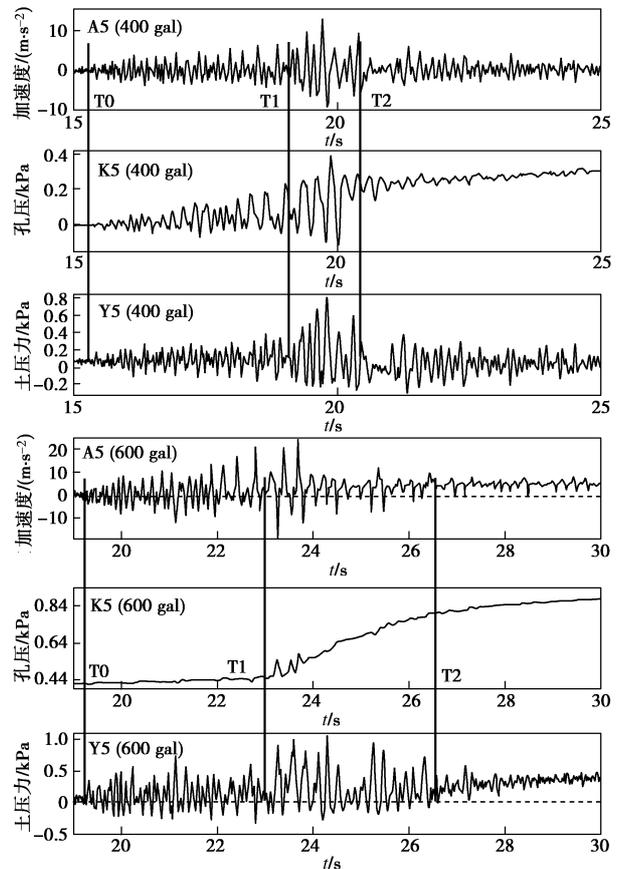


图 10 坡肩加速度、孔压及土压力时程

Fig. 10 Time history of acceleration, pore pressure and soil pressure at slope shoulder

时段基本以起伏波动变化为主, T2时刻起在波动基础上出现快速的平均单调上升变化——即出现残余孔压变化。动荷主要能量段作用结束后的 T3时刻, 孔压出现缓慢上升变化, 地震作用结束很长时段也没有消散, 最终孔压为 0.44 kPa。而坡肩水平向土压力则以正负交替的波动变化为主。

600 gal 孔压曲线总体趋势形态与 400 gal 相似, 但波动孔压变化幅度很小, T1时刻孔压出现快速上升变化, 此时加速度时程逐渐偏离基线位置, 并出现许多“Spike”(典型液化标志); T2时刻孔压上升速率变缓, 其值基本接近上覆压力, 而土压力则在波动基础上出现平均单调上升的变化形态, 这些现象表明土体性状发生根本性变化——即土体液化。

4 结论与讨论

(1) 根据宏观变形、土体动力特性及各物理量的变化特征, 可将地震和降雨耦合作下的黄土边坡变形演化及失稳破坏过程可分为 3 个阶段, 各阶段动力响应特征存在显著差异: ①弹性动变形阶段: 土体微结构损伤轻微, 边坡土体动力参数近线性小幅降低, 不同部位孔压、土压力以波动变化为主。②残余变形快速增加阶段: 坡顶残余孔压快速增大, 土体力学性能快速劣化, 边坡动力参数(自振频率和阻尼比)快速非线性变化(降低和增加)。③液化滑移阶段: 孔压快速增大并接近上覆压力, 加速度时程出现许多“spike”, 土压力出现平均单调上升变化形态。TFS 曲线呈弥散态, 无明显优势频率, 其均值接近于 2。

(2) 动力作用过程是边坡土体微结构不断损伤、土体力学性能不断劣化过程, 因此不同部位土体自振频率不断降低, 阻尼比不断增大。当荷载强度较小时, 瞬态响应频谱分量较为丰富且幅值较大; 随荷载强度增大, 瞬态响应不断弱化乃至消失, 加速度以稳态响应为主。黄土边坡不同部位土体加速度响应的大小取决于其自振频率与动荷主频的接近程度, 当荷载主频接近土体自振频率时, 加速度就会响应放大, 反之则响应衰减。

(3) 地震动力作用下边坡失稳过程是内因(自振特性)和外因(荷载特性)动态耦合作用过程。降雨后的黄土边坡, 由于坡顶土体含水率更高, 其力学性能更差。在动力作用下, 土体三相介质间应力、应变不断产生耦合作用^[12], 使得三相介质赋存状态及力学性状不断劣化, 当动荷强度达到一定程度, 孔压急剧升高并接近上覆压力, 土体液化, 液化土体在后续动力作用下还会出现顺坡向滑移。

(4) 传递函数频谱(TFS)幅值会随着荷载强度

增大逐步降低, 当模型失稳破坏时, TFS 峰值会低于某一特定数值, 该值可作为模型失稳的判据之一。

参考文献:

- [1] 王兰民, 吴志坚. 岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 401 - 412. (WANG Lan-min, WU Zhi-jian. Earthquake damage characteristics of the Minxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquake and its lessons[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 401 - 412. (in Chinese))
- [2] 徐舜华, 吴志坚, 孙军杰, 等. 岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特征及其诱发机制[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 471 - 476. (XU Shun-hua, WU Zhi-jian, SUN Jun-jie, et al. Typical landslide characteristics and induced mechanism of the Ms6.6 earthquake in Zhang County, Minxian County[J]. Earthquake Engineering, 2013, 35(3): 471 - 476. (in Chinese))
- [3] 吴志坚, 王兰民, 陈拓, 等. 汶川地震远场黄土地震动场地放大效应机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3736 - 3740. (WU Zhi-jian, WANG Lan-min, CHEN Tuo, et al. Study on the magnifying mechanism of earthquake ground in the far field loess site of Wenchuan Earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3736 - 3740. (in Chinese))
- [4] 言志信, 曹小红, 张刘平, 等. 地震作用下黄土边坡动力响应数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 610 - 614. (YAN Zhi-xing, CAO Xiao-hong, LIU Ping, et al. Numerical analysis of dynamic response of loess slope under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 610 - 614. (in Chinese))
- [5] 谢定义, 冯志焱. 对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 170 - 173. (XIE Ding-yi, FENG Zhi-yan. Some basic ideas on the study of effective stress in unsaturated soils[J]. Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 170 - 173. (in Chinese))
- [6] 吴志坚, 雷天, 陈豫津, 等. 黄土斜坡变形失稳破坏特征的振动台模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2015(7): 940 - 945. (WU Zhi-jian, CHEN Yu-jin, WANG Ping, et al. Study on the instability characteristics of loess slope based on shaking table model test[J]. Shanghai Jiao Tong University Journal, 2015(7): 940 - 945. (in Chinese))
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531 - 536. (SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural and

- Quantitative Parameters of Undisturbed Loess[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531 - 536. (in Chinese))
- [8] 林 皋, 朱 彤, 林 蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000(1): 1 - 8. (LIN Gao, ZHU Tong, LIN Bei. Similar techniques for structural dynamic model test[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [9] 蒋良滩, 姚令侃, 吴 伟, 等. 传递函数分析在边坡振动台模型试验的应用探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1368 - 1374. (JIANG Liang-wei, YAO Ling-kan, WU Wei, et al. Application of transfer function analysis on slope shaking table model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1368 - 1374. (in Chinese))
- [10] WANG L M, WU Z J. Influence of site condition on seismic amplification effects during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(S2): 175 - 178.
- [11] WANG L M, WU Z J, XIA K. Effects of site conditions on earthquake ground motion and their applications in seismic design in loess region[J]. Journal Mountain Science, 2017, 14(6): 1185 - 1193.
- [12] 栾茂田, 李顺群, 杨 庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 863 - 868. (LUAN Mao-tian, LI Shun-qun, YANG Qing. Study on matrix suction and tension suction of unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 863 - 868. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)