

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2335

地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响

张泽林^{1,2}, 吴树仁¹, 王 涛¹, 唐辉明², 梁昌玉¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 研究地震作用下黄土-泥岩边坡动力响应特征, 对边坡的稳定性评价和抗震设计具有重要指导意义。基于边坡的离心机振动台试验和数值模拟分析, 研究地震波振幅对边坡地震动响应的影响规律, 结果表明: 由坡体深部至浅表层, 黄土-泥岩边坡的水平向和垂向加速度放大效应呈非线性增加, 且水平向大于垂向, 在坡体顶部到达最大, 表现为趋表效应和高程效应; 在边坡内部岩性接触部位, 黄土层内动力响应较大, 泥岩中动力响应较小, 表现为岩性效应; 随着输入地震波振幅的增加, 坡体动力响应表现为先增大后减小的趋势, 当输入振幅达 0.3g 时, 坡体动力响应最大。黄土-泥岩边坡的变形破坏过程为: 随输入地震波振幅增加, 坡顶逐渐形成拉张裂缝, 不断扩展, 坡体中上部溜土, 产生向临空面方向的位移, 坡体中部发生鼓胀隆起, 局部坡体振动松散, 岩土体滑落至坡脚堆积。

关 键 词: 离心机振动台试验; 数值模拟; 黄土-泥岩边坡; 加速度振幅; 地震动响应

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2403-11

Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope

ZHANG Ze-lin^{1,2}, WU Shu-ren¹, WANG Tao¹, TANG Hui-ming², LIANG Chang-yu¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: Studying the seismic dynamic responses of loess-mudstone slope is important for the slope stability evaluation and engineering aseismatic design. The effects of seismic wave amplitude on the seismic dynamic responses of loess-mudstone slope are investigated by the centrifuge shaking table tests and numerical simulation. Results show that: the amplification of horizontal and vertical acceleration of loess mudstone slope increases nonlinearly from deep to shallow surface of the slope. The horizontal amplification is greater than the vertical, and it reaches the maximum value at the crest. The dynamic response of the loess layer is larger than that of the mudstone inside the slope. With the increasing of the amplitude of the input seismic wave, the dynamic response of the slope increases first and then decreases. When the input amplitude reaches 0.3g, the dynamic response of the slope reaches the maximum value. The deformation and failure process of the loess-mudstone slope could be summarized as: with the input of seismic wave amplitude increasing, tension crack formed at the crest, gradually expands, displacements develop towards the free face, and then overlying loess raises lightly, some soil accumulates at the slope toe.

Keywords: Centrifuge shaking table test; numerical simulation; loess-mudstone slope; acceleration amplitude; earthquake response

1 引 言

边坡的动力问题一直是工程地质界所关注的焦点。起初的研究主要通过拟静力法、Newmark 滑块位移法和有限元数值模拟方法解决边坡的动力稳定性问题^[1-6]。随着科技的发展, 目前主要通过现场

监测、物理模拟试验和数值模拟方法^[5-12]来分析边坡动力响应问题, 所关注的主要内容包括坡体内部的应力场、加速度场、速度场和位移场的强度时空变化规律。但是, 由于边坡地震动的现场监测手段实施难度大, 需要建立大量的台站进行数据获取, 而数值模拟的方法受到岩土体本构模型和边界条件

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41572313); 地调资助项目(No. 12120114035501); “十二五”科技支撑资助项目(No. 2012BAK10B00)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572313), the Project of China Geological Survey (12120114035501) and the National Science Technology Program of the Ministry of Science During the 12th Five-year Plan Period (2012BAK10B00).

第一作者简介: 张泽林, 男, 1984 年生, 在站博士后, 主要从事地震滑坡、边坡动力学方面的研究工作。E-mail: 249133236@qq.com

设置的影响,其计算结果也有待验证^[3,9]。近年来,物理模拟中的振动台试验飞速发展,是实验室模拟边坡地震的重要方法,一些岩质边坡和土质边坡的动力响应特征得到了一定程度的研究^[11,13-16]。单纯的振动台试验虽然能实现三线地震波的输入,却不能满足关键的地应力相似比,同时由于承载力的限制,存在重力失真和尺寸效应等问题,造成不可避免的误差,并不能符合实际情况,难以合理的解释边坡岩土体的动力学机制。

而借助离心机试验,根据相似性原理和量纲分析方法,能够真实模拟边坡内部应力条件,加上振动台输入动荷载达到模拟边坡地震响应的目的,是目前物理模型试验中的最佳方法。近期发展起来的离心机上的振动台试验,由于具有模拟相似比方面的优势,在模拟边坡的地震动响应方面获取了一些进展。利用离心机上的振动台试验,Taboada 等^[17]分析了地震作用下边坡的砂土液化机制,Bao 等^[18]还结合数值模拟方法研究了地震作用下钢板桩支护的边坡地震动响应特征,李祥龙等^[19-20]探索了反倾岩质边坡和顺层岩质边坡的地震动变形破坏特征,Wang 等^[21]研究了地质作用下边坡内部抗滑桩的加固效应,Hashash 等^[22]揭示了地震作用下砂土边坡的场地响应规律。Dong 等^[23]深入探讨了黏土边坡的地震稳定性和敏感性。但是上述研究只输入水平向地震波,忽略了垂直地震波的影响,且使用刚性模型箱,在边界条件设置上难以实现自由边界,从而达到实际地震发生的环境。

2008 年汶川地震以来,关于西南山区边坡的动力响应研究取得了丰硕的成果^[3,7-8,11-12,15]。但是目前是地震活跃期,我国西北地区同样地处地震活跃区域,历史上也曾多次发生强震^[24],引发大量的黄土-泥岩边坡发生破坏,并造成了重大的经济损失和人员伤亡。而关于西北地区黄土-泥岩边坡的地震动响应规律的研究较少,一些学者仅通过数值模拟的方法研究了黄土边坡的地震动响应特征^[25-27],还有待物理模型试验的验证。为避免或减轻地震造成的边坡破坏,地震边坡动力响应特征的研究无疑是边坡的抗震设计和防灾减灾的基础。我国西北地区黄土-泥岩特殊结构的边坡,在强震作用下易发生破坏,并且其动力响应机制研究程度较低,因此亟待开展相关研究。鉴于此,本文针对甘肃天水地区典型黄土-泥岩边坡,开展 1:40 相似比的离心机振动台试验,并结合有限元模拟方法互相验证,旨在探讨地震波振幅对黄土-泥岩边坡地震动响应特征的影响,为该地区边坡的稳定性评价和抗震设计提供

参考。

2 边坡的离心机振动台试验

2.1 离心机系统

试验依托中国水利水电科学研究院土工离心机实验室新建的大型离心机上的振动台(见图 1)开展。LXJ-4-450 离心机有效转动半径为 5.03 m,最大负荷载为 $450g \cdot t$,最大离心加速度可达 $300g$,配套的振动台 R500B 尺寸为 $2 m \times 2 m \times 2 m$,由美国研制,可实行水平+垂直双向振动,是目前最为先进的离心机振动台,输入的振动波形可重复,振动误差小于 5%。根据相似比定律,土工离心机通过高速运转增加重力加速度 g ,使得模型达到实际原型的应力状态。试验以天水地区黄土-泥岩边坡为原型,确定试验方案,选取较为合适的相似比 40,在离心机转动达到 $40g$ 的重力加速度值时完成动力输入,相关相似量纲见表 1。



图 1 水平+垂直双向离心机振动台
Fig.1 Horizontal and vertical centrifuge shaking table

表 1 物理模型试验的相似比

Table 1 Similitude ratios of the parameters in model test

类型	物理量	量纲	相似比(模型/原型)
尺寸	长度 l	L	1/40
	位移 s	L	1/40
	密度 ρ	ML^{-3}	1
	重度 γ	$ML^{-2}T^{-2}$	40
材料属性	黏聚力 c	$ML^{-1}T^{-2}$	1
	内摩擦角 ϕ	-	1
	应力 p	$ML^{-2}T^{-2}$	1
	应变 ε	-	1
动力属性	重力加速度 g	LT^{-2}	40
	加速度 a	LT^{-2}	40
	(振动) 时间 t	T	1/40
	频率 f	T^{-1}	40

2.2 物理模型的制作

以往的物理模型采用刚性模型箱,通过涂抹凡

士林,认为边坡模型的边界达到自由状态,但这或多或少存在一定约束。此次采用土木结构模拟所使用的环状剪切模型箱^[28],内径尺寸为 745 mm×353 mm×510 mm(见图 2),能较好地解决自由边界的问题。在查明研究区工程地质条件基础上,对边坡原型进行了简化,提取并设计了概化的黄土-泥岩二元结构边坡模型,模型高为 500 mm,长为 740 mm,具体尺寸见图 3(a)。

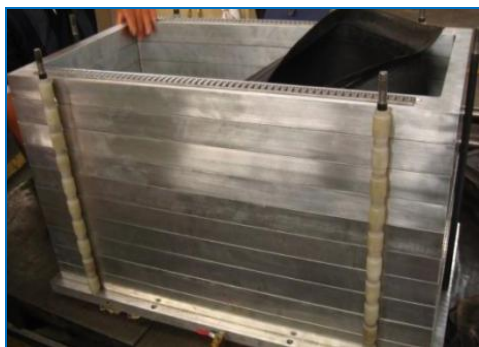


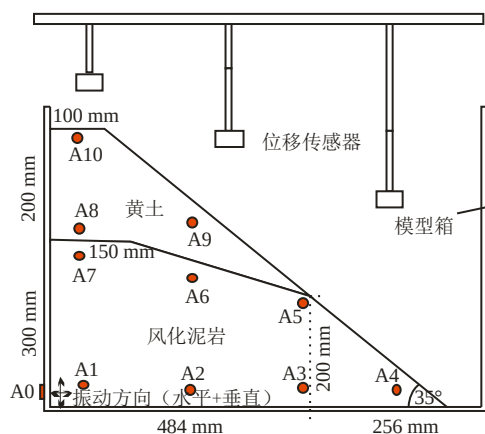
图 2 层状模型箱

Fig.2 Stratiform rectangular rings model casing

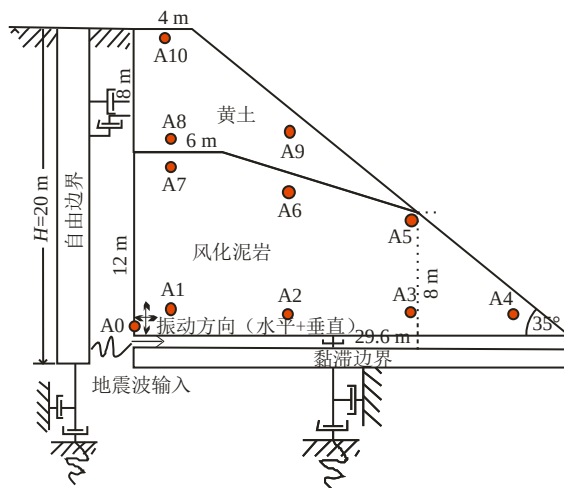
制作边坡模型的材料从研究区取样,其物理力学性质见表 2。制作模型时,首先将土体烘干后碾

碎,过 5 mm 筛,并配置到相应含水率,搅拌均匀,养护 12 h 备用。由于风化泥岩近似于硬土的性质,故在模型制作时通过重度来控制体积,分层击实,每 30 mm 为一层,考虑实际情况,边坡由底部至顶部的强度逐渐减低,黄土与泥岩的接触面制作时采取粗糙接触边界。边坡模型内设置 10 个水平和垂向加速度传感器(A1~A10),模型箱外部设置 1 个加速度传感器参照点 A0,3 个激光位移传感器用来监测坡面关键点的位移,具体见图 3。最终通过电脑采集系统获取试验数据。

试验中动力输入选取了距离研究区最近台站记录的 2013 年 7.22 岷县地震波(垂直+水平振动),峰值加速度 $PGA \approx 0.2g$ (见图 4)。为研究地震波的振幅对坡体的动力特征造成的影响,分析在逐渐增大地震波振幅条件下边坡的破坏机制和动力响应特征,输入动力时,将图 4 地震波加速度振幅的幅值分别调整至 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g 和 0.5g 这 5 种工况。试验完成后,将坡体内各点的水平和垂向加速度峰值 $PGA_{xA1} \sim PGA_{xA10}$, $PGA_{yA1} \sim PGA_{yA10}$ 分别与模型箱外侧参照点记录的动力输入波峰值 PGA_{xA0} 和 PGA_{yA0} 的比值作为加速度放大系数进行研究,以下动力响应数据将按照相似率换算成对应的原型进行分析。



(a) 物理模型



(b) 数值模型

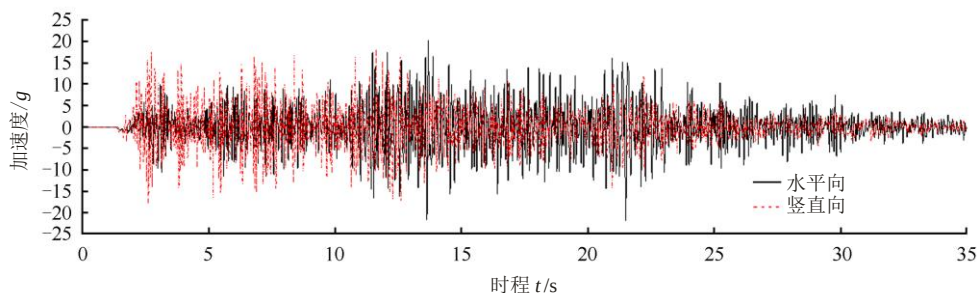
图 3 黄土-泥岩边坡物理模型和数值模型

Fig.3 Physical mode numerical mode of loess-mudstone slope

表 2 模型材料参数

Table 2 Material parameters in model tests

材料	密度 ρ /(kN/m^3)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	含水率 /%	泊松比	弹性模量 /MPa	剪切模量 /MPa	抗拉强度 /kPa	剪胀角 /($^{\circ}$)
黄土	15.1	18	20	13.5	0.3	10.3	10.3	2.5	0
风化泥岩	18.5	32	29	13.2	0.3	45.0	45.0	4.5	0

图4 输入地震波原型 (峰值加速度 $PGA \approx 0.2g$)Fig.4 Input prototype seismic wave in tests (peak ground acceleration $0.2g$)

3 边坡的数值模型

由于离心机振动台试验代价昂贵,且有些坡体内部监测技术难以实施,而数值模拟方法在分析复杂的岩土体动力响应特征方面具有一定优势。为此,通过有限差分方法 (Flac^{2D} 商业软件),对现场的边坡原型进行了模拟,能更清楚地观测到坡体内部的地震动响应特征变化,同时还可将两种方法得到的结果互相验证。数值模拟的建立、边界条件和监测点的设置如图 3(b)所示,边坡原型高为 20 m。模型侧边界设置为自由边界^[10, 25-26],底部为黏滞边界,相当于模型侧边和底部的初始位移均为 0。为了避免输入地震波失真,影响模拟的精确性,同时考虑到最大频率和最小剪切波速问题,数值模型单个网格划尺寸最大不超过 2 m^[29]。计算时采用摩尔-库仑弹塑性模型,岩土体的物理力学参数见表 2。模型在重力计算平衡后,开始动力输入,阻尼采用滞后阻尼,岩土体材料的阻尼比通过动三轴试验获取,风化泥岩阻尼比为 1%,黄土阻尼比为 0.8%。地震波沿模型底边输入,同样采用图 4 所示的岷县地震波原型,将地震波加速度振幅的幅值分别调整至 0.1g、0.2g、0.3g、0.4g 和 0.5g 这 5 种工况。

4 边坡加速度响应规律

基于物理模型和数值模拟的结果,通过分析 A0

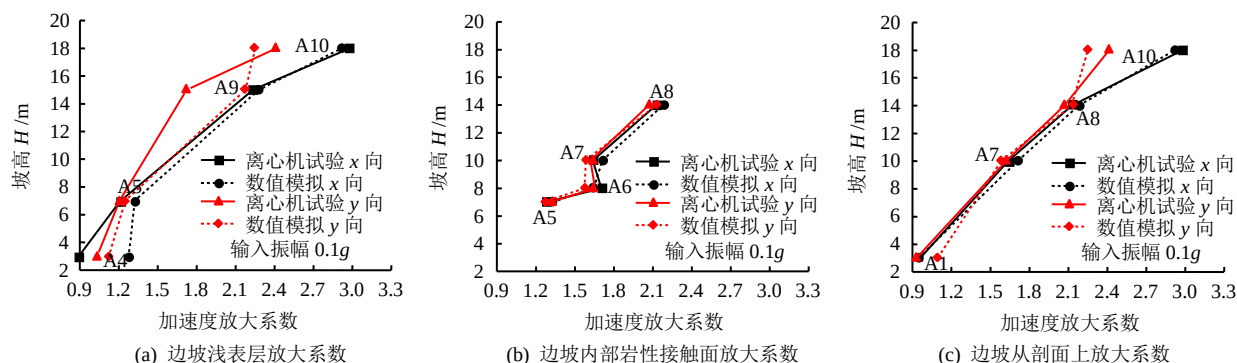
至 A10 各个监测点的加速度峰值 PGA ,得到加速度放大系数,图 5~9 为地震波加速度振幅 0.1g~0.5g 时的边坡内部关键部位加速度放大特征曲线。以输入双向(垂直+水平)地震波加速度振幅 0.1g 为例,分析黄土-泥岩边坡内部关键部位的加速度放大系数的变化规律。

4.1 坡面加速度响应规律

黄土-泥岩边坡表面岩土体在水平和垂向激振波下的加速度响应放大规律如图 5(a)所示。其水平向和垂向加速度系数的增加趋势基本相同,呈非线性增大,在坡顶处(A10)达到最大值,水平向最大为 2.8,垂向最大为 2.3,且水平向放大系数略大于垂直方向。而坡脚处的加速度放大系数接近 1,说明响应较小。边坡表面的加速度放大作用表现为越接近边坡浅表部和坡顶,加速度放大作用越明显,即趋表效应。

4.2 坡体内部关键岩性接触面加速度响应规律

双向地震波作用下,从边坡内部岩性接触部位加速度放大系数的变化规律发现(见图 5(b)),强度相对较低的黄土层内(A8)的动力响应较大,风化泥岩(A5、A6、A7)响应较小。同样,水平向放大作用略大于垂向,且呈非线性增加。岩土体的强度对地震波的放大作用有一定影响,表现为岩性效应。

图5 黄土-泥岩边坡内部 PGA 放大系数曲线 (输入振幅 0.1g)Fig.5 PGA amplification characteristic inside loess-mudstone slope (input $0.1g$)

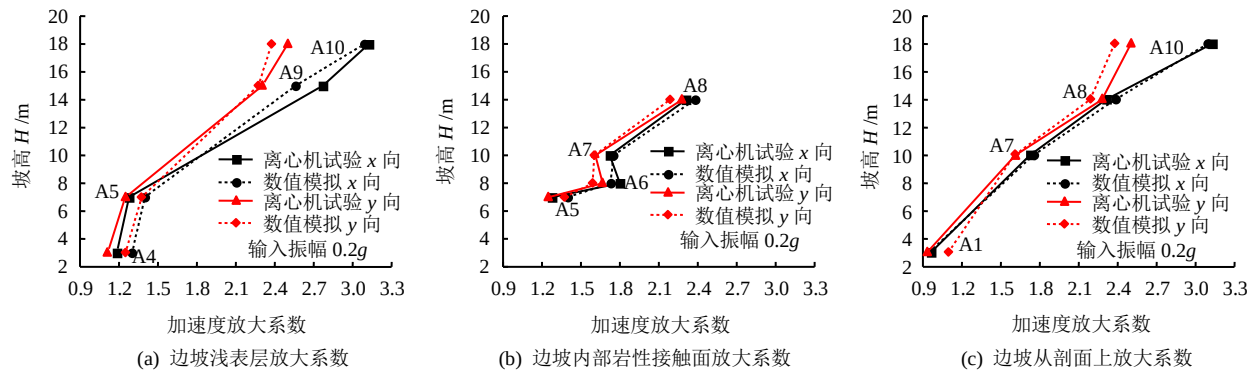


图6 黄土-泥岩边坡内部 PGA 放大系数曲线 (输入振幅 0.2g)

Fig.6 PGA amplification characteristic inside loess-mudstone slope (input 0.2g)

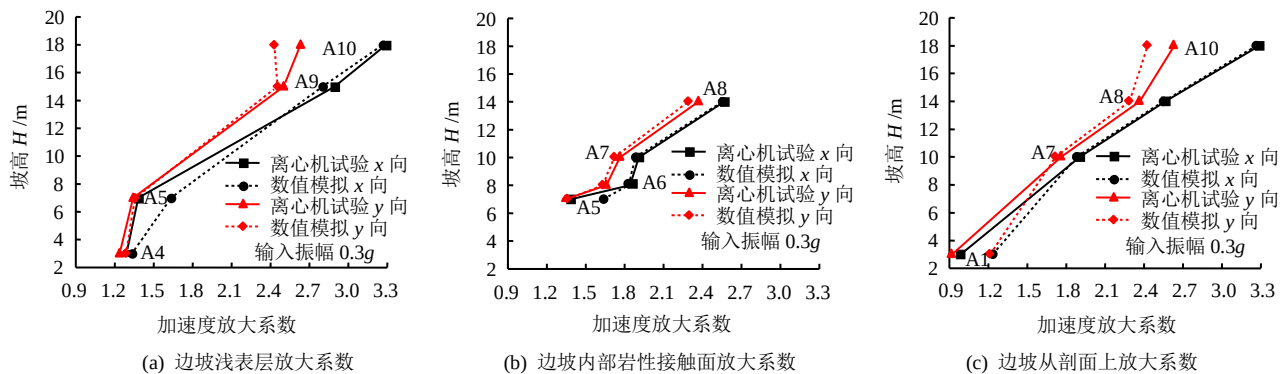


图7 黄土-泥岩边坡内部 PGA 放大系数曲线 (输入振幅 0.3g)

Fig.7 PGA amplification characteristic inside loess-mudstone slope (input 0.3g)

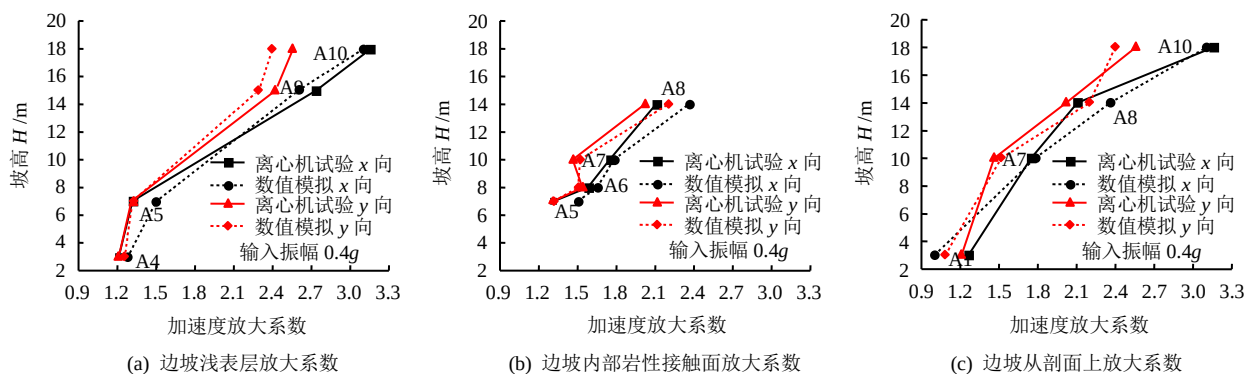


图8 黄土-泥岩边坡内部 PGA 放大系数曲线 (输入振幅 0.4g)

Fig.8 PGA amplification characteristic inside loess-mudstone slope (input 0.4g)

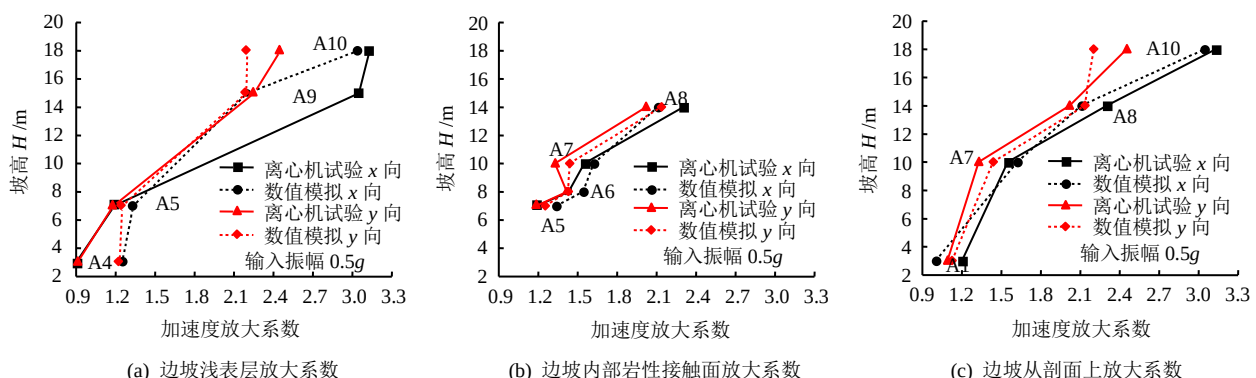


图9 黄土-泥岩边坡内部 PGA 放大系数曲线 (输入振幅 0.5g)

Fig.9 PGA amplification characteristic inside loess-mudstone slope (input 0.5g)

4.3 坡体内部加速度响应规律

双向地震波作用下, 坡体内部的加速度响应规律表现为高程效应(见图 5(c))。在边坡内部随着高程的增加, 加速度响应系数表现为呈非线性增大趋势, 水平向略大于垂向。图 6~9 中, 加速度放大系数的变化趋势与图 5 中基本相似。前人的研究也表明在不同材料的边坡内部加速度放大系数基本是随着坡高的增加而增大。这类第三系泥岩为基底, 黄土为覆盖层的边坡在地震作用下, 表层黄土地震响应较大, 易发生破坏。

从物理试验和数值模拟结果来看, 各监测点的放大系数基本一致, 差别不大。但部分监测点 A9 和 A8 放大系数离散性较大, 相差最大为 0.5, 这可能是由于数值模型是均质的, 而物理模型的制作工艺影响到试验结果, 如果模型局部夯实不均匀或加速度传感器埋设略有偏差易造成部分关键部位的加速度放大系数有所差别。

4.4 地震波振幅对坡体动力响应的影响

从整个物理试验和数值模拟的结果来看, 随着输入地震波加速度振幅的增加, 坡体内部的监测点位的加速度放大系数均表现为先增大后减小的趋势(见图 10~13)。坡体内部地震动响应在输入地震波加速度振幅为 $0.3g$ 时, 达到最大值, 此时坡体振动松动, 而在继续增加输入振幅后反而有减小的趋势, 可能坡体内部岩土体发生了振动挤密现象。水平向和垂直向加速度放大趋势基本相同, 但水平向加速度放大效应大于垂向, 说明水平地震力对边坡的稳定性影响较大。从曲线变化来看, 数值模拟结果离散性较好, 物理试验中监测点 A8, A9 的水平向加速度响应放大系数变化发生离散, 可能是由于数值模拟建立的是均质的材料模型, 而物理模型制作时存在一定误差, 造成局部夯实不均匀, 并且表层黄土受到水平地震力作用, 导致内部形成拉张裂隙, 地震动响应较大。

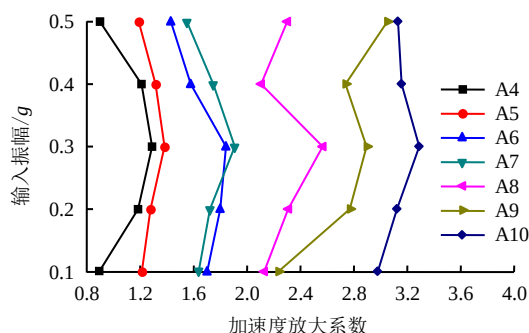


图 10 不同振幅下边坡关键点水平向 PGA 放大系数 (物理模型试验结果)

Fig.10 Slope horizontal PGA amplification characteristic under seismic waves with different amplitudes

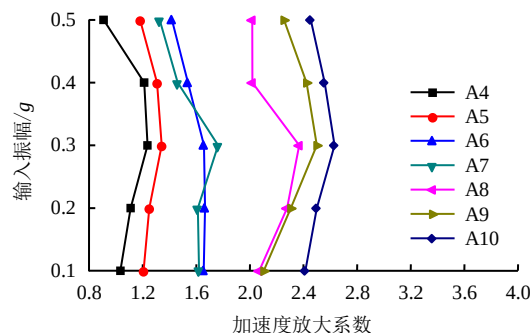


图 11 不同振幅下边坡关键点垂向 PGA 放大系数 (物理模型试验结果)

Fig.11 Slope vertical PGA amplification characteristic under seismic waves with different amplitudes

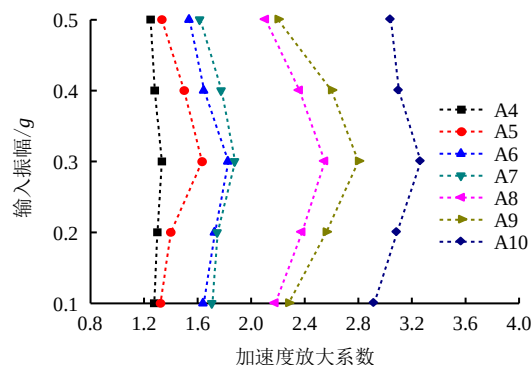


图 12 不同振幅下边坡关键点水平向 PGA 放大系数 (数值模拟结果)

Fig.12 Slope horizontal PGA amplification characteristic under seismic waves with different amplitudes

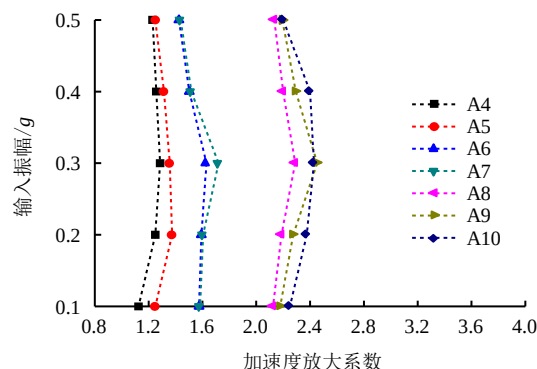


图 13 不同振幅下边坡关键点垂向 PGA 放大系数 (数值模拟结果)

Fig.13 Slope vertical PGA amplification characteristic under seismic waves with different amplitudes

在逐渐增大的输入振幅下, 坡顶的动力响应也逐渐增加, 部分加速度时程曲线见图 14 和图 15。总的来说, 坡顶的加速度放大效应表现出了异常放大的特征。综上所述, 在逐渐增大的输入地震波加速度振幅下, 黄土-泥岩边坡内部水平向和垂向加速度放大效应表现为坡面的趋表效应、高程效应和岩性组合效应。随输入地震波加速度振幅的增加, 坡体内部加速度放大作用表现为先增大后减小的趋势。

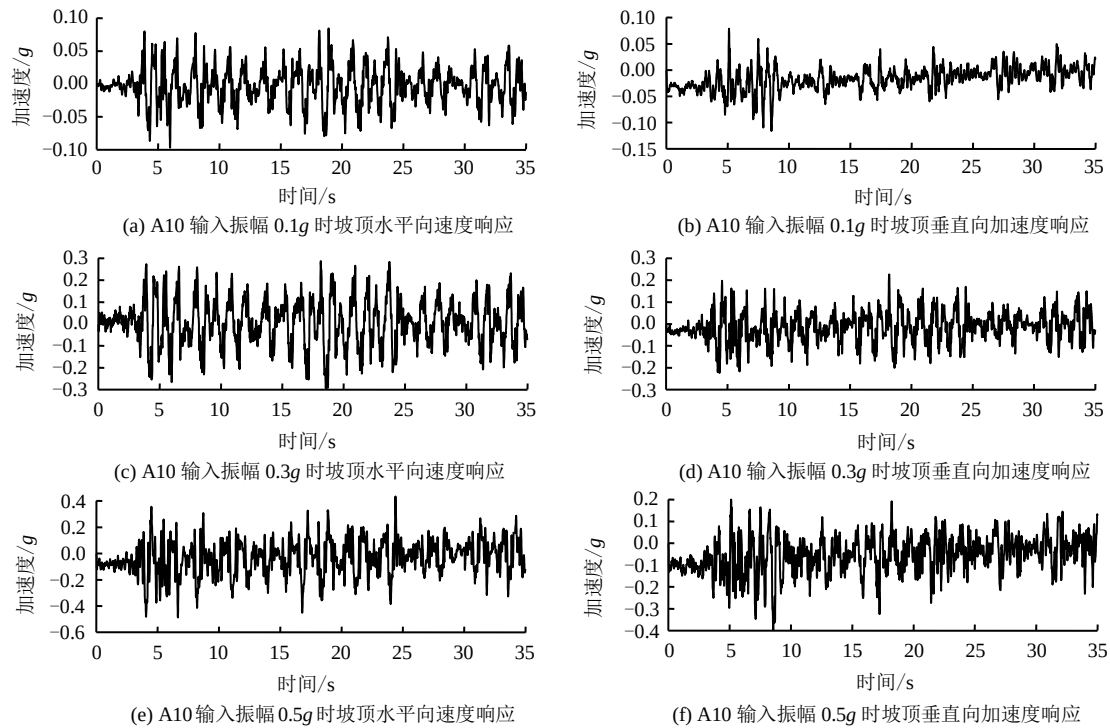


图 14 坡顶 A10 水平向和垂直向加速度时程曲线 (物理模型)

Fig.14 Horizontal and vertical acceleration time history curves at crest A10 (physical modelling)

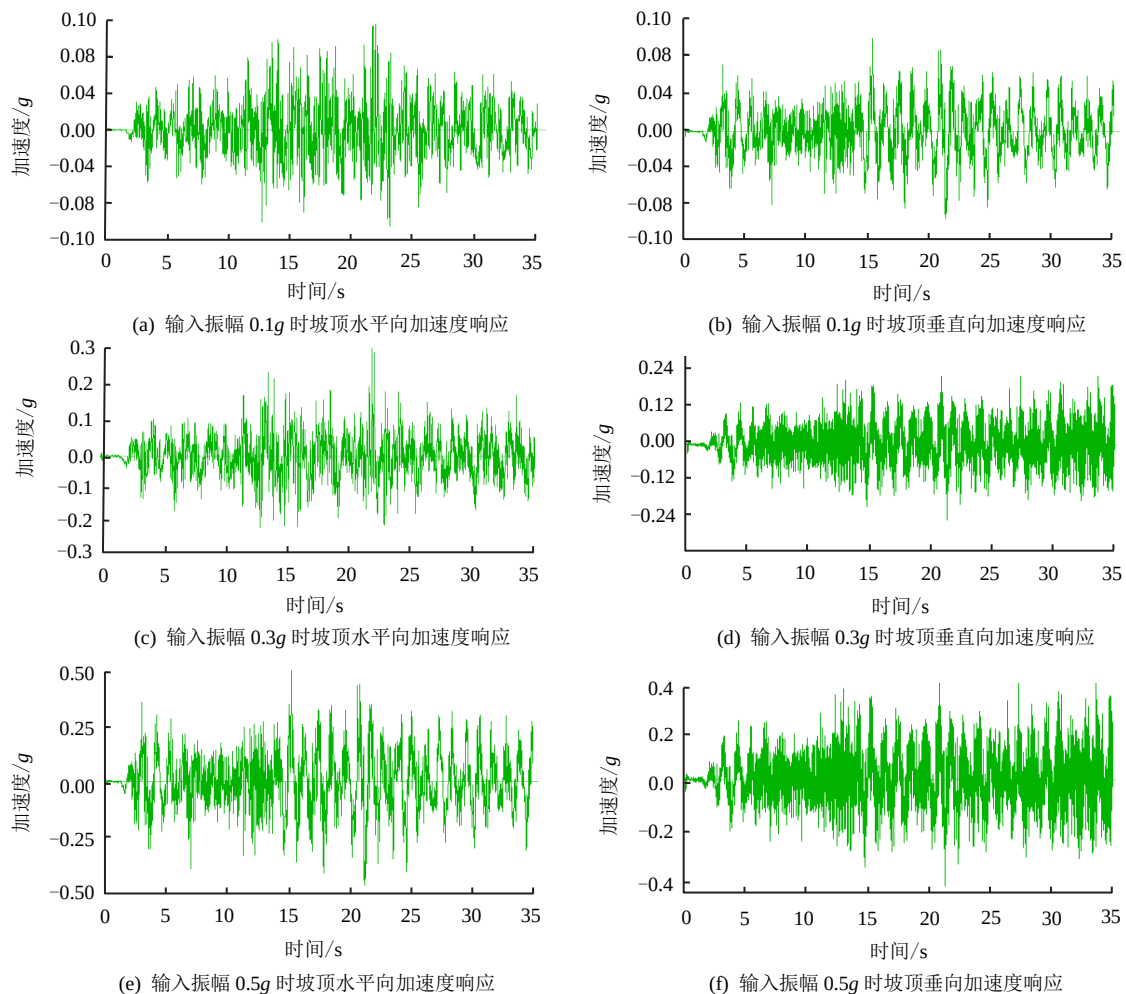


图 15 坡顶 A10 水平向和垂直向加速度时程曲线 (数值模型)

Fig.15 Horizontal and vertical acceleration time history curves at crest A10 (numerical simulation)

5 边坡地震动变形破坏特征

基于物理试验和数值模拟结果,在逐渐增大的输入地震波振幅情况下,坡体内部的位移响应如图 16 所示,结果相差不大,坡顶部位移大于坡体中部,坡脚位移最小,随着输入地震波振幅增加,坡体表面的位移响应是逐渐增大的。随着输入振幅的增加,坡顶的位移响应异常增大(见图 17)。物理试验的位移响应要略大于数值模拟的结果。在物理试验过程中,当输入地震波振幅为 $0.1g$ 和 $0.2g$ 时,边坡未发生明显变形。当输入振幅为 $0.3g$ 时,坡体顶部形成拉张裂缝,坡体表面小规模溜土。当输入振幅为 $0.4g$ 时,坡体浅表部拉张裂隙有所扩张,当输入振幅为 $0.5g$ 时,坡体后缘形成多条拉张裂隙,坡顶位移明显增加,溜滑掉土现象严重。最终的变形破坏状态见图 18,受边界条件的影响,边坡的模型后缘与模型箱分离。结合数值模拟坡体内部塑性区变化状态来看,在黄土层内形成了剪塑性区,而随着输入振幅的增加,坡体深部的剪塑性区逐渐形成并扩展,当输入振幅达 $0.3g$ 时,坡体深部形成了

贯通的剪塑性区(见图 19)。由于基底泥岩较上部黄土坚硬,所消耗的地震波能量大,动力响应较小,而边坡顶部黄土较松散,其动力响应就较大。由此,可将地震作用下黄土-泥岩边坡的变形破坏过程归纳为:坡肩形成拉张裂隙,坡肩产生向临空面方向的位移,坡体中上部的黄土覆盖层隆起,部分土体振松滑落并堆积在坡脚。

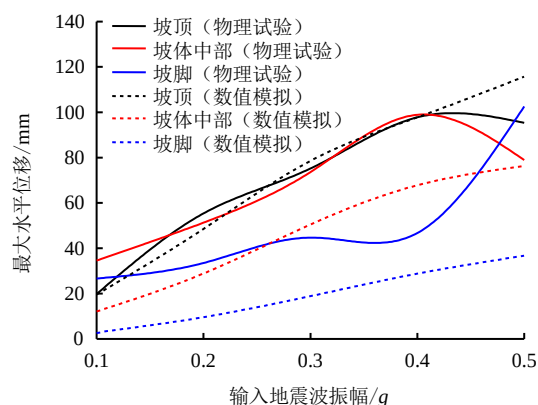


图 16 黄土-泥岩边坡最大水平位移 (物理模拟)
Fig.16 Maximum horizontal displacement of loess-mudstone slope (physical modelling)

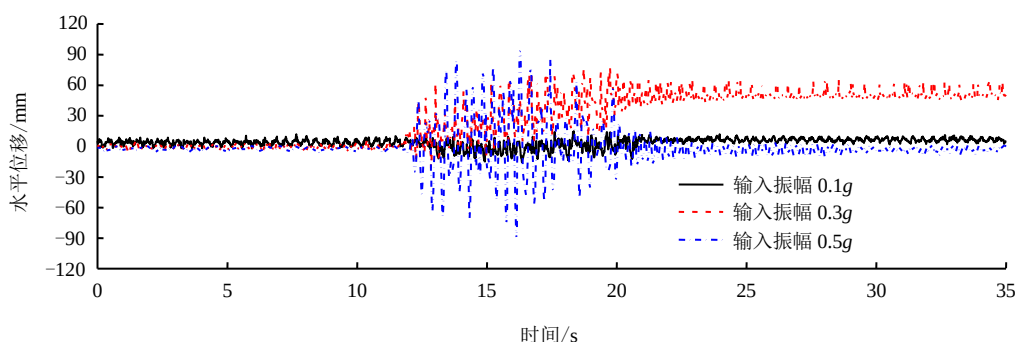
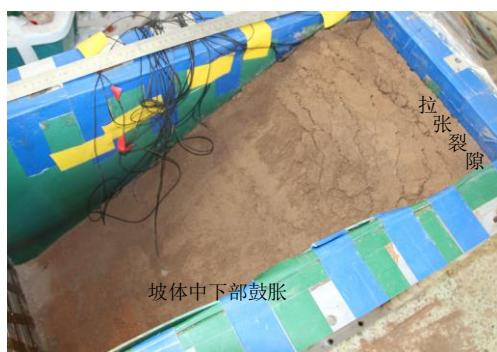
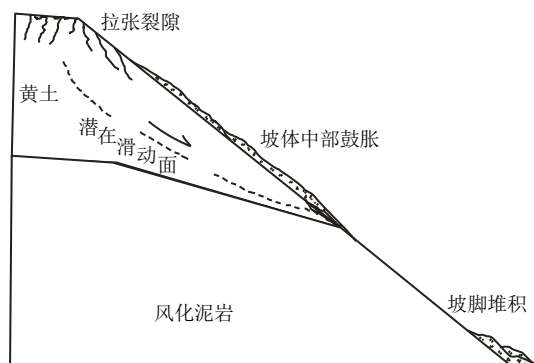


图 17 坡顶水平位移时程曲线 (物理模拟)

Fig.17 Horizontal displacement time history curves at crest (physical modelling)



(a) 斜坡模型最终变形破坏照片



(b) 斜坡模型最终变形破坏示意图

图 18 地震作用下黄土-泥岩边坡破坏特征

Fig.18 Destruction characteristics of loess-mudstone under earthquake

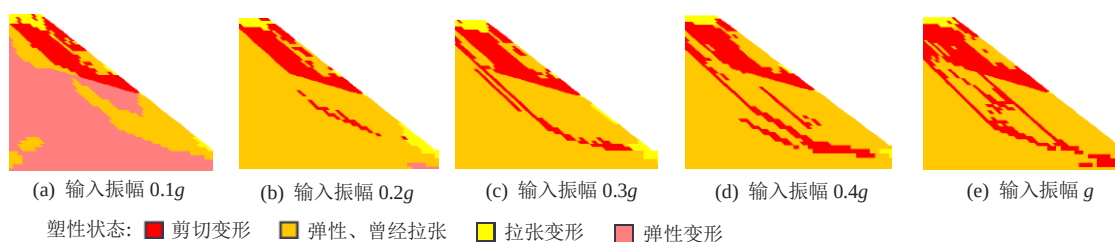


图 19 黄土-泥岩边坡塑性区状态
Fig.19 plastic state of loess-mudstone slope

需要指出的是, 本项研究关于地震动输入均是从模型底部岩 0 角度入射, 没有考虑地震波入射角度的影响。相关研究^[30]认为地震波入射角度为 0° 时, 所施加的地震荷载最大更容易造成边坡的破坏。而边坡动力学是一个复杂的问题, 影响坡体响应的因素众多。这里我们重点考虑了输入地震波振幅的影响。在今后的研究中, 应当考虑地震波入射角度问题对边坡动力响应造成的影响。

6 结 论

(1) 由坡体深部至浅表层, 黄土-泥岩边坡的水平向和垂向加速度响应呈非线性增加, 且水平向响应略大于垂向, 在坡体顶部到达最大, 表现为趋表效应。

(2) 从坡体底部至坡体顶部, 黄土-泥岩边坡的加速度响应随着坡高的增加而增大, 呈非线性, 水平向响应略大于垂向, 表现为高程效应

(3) 在边坡内部岩性接触部位, 边坡动力响应表现为岩性效应, 即在黄土层内动力响应较大, 而在底部泥岩中动力响应较小。

(4) 随输入地震波振幅的增加, 造成部分岩土体振动松动, 坡体的动力响应逐渐增加, 当输入振幅达 0.3g 时, 响应最大, 而继续增加输入振幅, 岩土体又发生了振动挤密, 坡体动力响应反而减小。

(5) 将黄土-泥岩边坡的变形破坏过程归纳为: 随输入地震波振幅增加, 坡顶逐渐形成拉张裂缝, 不断扩展, 坡体中上部溜土, 产生向临空面方向的位移, 坡体中部发生鼓胀隆起, 局部坡体振动松散, 岩土体滑落至坡脚堆积。

致谢: 试验在中国水利水电科学研究院岩土工程研究所的离心机模型试验室完成, 非常感谢水科院的侯瑜京教授、张雪东博士、彭仁博士和王存硕士等在试验中给予的指导和帮助!

参 考 文 献

[1] 薛海斌, 党发宁, 尹小涛, 等. 基于动力学和材料软化特性的边坡渐进破坏特征研究[J]. 岩土力学, 2016,

37(8): 2238—2246.

XUE Hai-bin, DANG Fa-ning, YIN Xiao-tao, et al. Progressive failure characteristics of slopes considering strain-softening behavior of geotechnical materials and dynamics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2238—2246.

[2] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(2): 139—160.

[3] 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.

XU Qiang, LIU Han-xiang, 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.

[4] HAN B, ZDRAVKOVIC L, KONTOS S. Stability investigation of the generalized- α , time integration method for dynamic coupled consolidation analysis[J]. **Computers & Geotechnics**, 2015, 64: 83—95.

[5] ZHAO L H, CHENG X, ZHANG Y, et al. Stability analysis of seismic slopes with cracks[J]. **Computers & Geotechnics**, 2016, 77: 77—90.

[6] 沈华章, 郭明伟, 王水林, 等. 基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 592—600.

SHEN Hua-zhang, GUO Ming-wei, WANG Shui-lin, et al. Vector sum method for slope stability analysis based on discrete elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 592—600.

[7] 王福海, 王运生, 孙刚, 等. 地震荷载作用下斜坡响应研究: 以四川青川东山-狮子梁剖面为例[J]. 现代地质, 2011, 25(1): 142—150.

WANG Fu-hai, WANG Yun-sheng, SUN Gang, et al. Study on slope response under seismic loading taking the Dongshan-Shiziliang profile in Qingchuan, Sichuan as an example[J]. **Geoscience**, 2011, 25(1): 142—150.

- [8] 罗永红, 王运生, 王福海, 等. 青川县桅杆梁斜坡地震动响应监测研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 27—34.
LUO Yong-hong, WANG Yun-sheng, WANG Fu-hai, et al. Monitoring of slope seismic response during aftershocks of Wenchuan earthquake in Qingchuan county[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(1): 27—34.
- [9] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震作用下黄土泥岩边坡动力响应及破坏特征离心机振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1844—1853.
ZHANG Ze-lin, WU Shu-ren, WANG Tao, et al. Centrifugal shaking table test on dynamic response and failure characteristics of loess-mudstone slopes under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(9): 1844—1853.
- [10] 祁生文, 伍法权, 孙进忠. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学, 2003, 33(增刊): 28—40.
QI Sheng-wen, WU Fa-quan. Study on dynamic responses of slope[J]. **Science in China(Series E): Technological Science**, 2003, 33(Supp.): 28—40.
- [11] HUANG R, ZHAO J, JU N, et al. Analysis of an anti-dip landslide triggered by the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. **Natural Hazards**, 2013, 68(2): 1021—1039.
- [12] YIN Y. Vertical acceleration effect on landslides triggered by the Wenchuan earthquake, China[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2014, 71(11): 4703—4714.
- [13] WANG K L, LIN M L. Initiation and displacement of landslide induced by earthquake—a study of shaking table model slope test[J]. **Engineering Geology**, 2011, 122(1–2): 106—114.
- [14] WANG JIAN, YAO LINGKAN, ARSHAD HUSSAIN. Analysis of earthquake-triggered failure mechanisms of slopes and sliding surfaces[J]. **Journal of Mountain Science**, 2010, 7(3): 282—290.
- [15] 涂杰文, 刘红帅, 汤爱平, 等. 基于离心振动台的堆积型滑坡加速度响应特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1361—1369.
TU Jie-wen, LIU Hong-shuai, TANG Ai-ping, et al. Acceleration response characteristics of colluvial landslide based on centrifugal shaking table model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(7): 1361—1369.
- [16] 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, 49(7): 940—945.
WU Zhi-jian, LEI Tian, CHEN Yu-jin, et al. Deformation and instability characteristics of loess slope based on shaking table model test[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2015, 49(7): 940—945.
- [17] TABOADA URTUZUASTEGU V M, MARINEZ RAMIREZ G, ABDOUM T. Centrifuge modeling of seismic behavior of a slope in liquefiable soil[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(9–12): 1043—1049.
- [18] BAO X H, YE G L, YE B, et al. Seismic performance of SSPQ retaining wall—centrifuge model tests and numerical evaluation[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2014, 61—62(3): 63—82.
- [19] 李祥龙, 唐辉明, 王立朝. 顺层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 729—736.
LI Xiang-long, TANG Hui-ming, WANG Li-chao. Centrifuge modelling tests on dynamic failure of bedding rock slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 729—736.
- [20] 李祥龙, 唐辉明. 逆层岩质边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 687—694.
LI Xiang-long, TANG Hui-ming. Dynamic centrifugal modelling tests on toppling rock slopes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 687—694.
- [21] WANG L P, ZHANG G. Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions[J]. **Landslides**, 2014, 11(2): 213—223.
- [22] HASHASH Y M A, DASHTI S, Romero M I, et al. Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2015, 78: 19—31.
- [23] DONG S P, KUTTER B L. Static and seismic stability of sensitive clay slopes[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2015, 79: 118—129.
- [24] 国家地震局兰州地震研究所. 陕甘宁青四省(区)强震目录(公元前 1177 年—公元 1982 年)[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985.
Seismological Institute of Lanzhou, SSB. Catalogue of strong earthquakes in Shaanxi, Gansu, Ningxia, Qinghai Province (1177 BC–1982AD)[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1985.