

DOI: 10.11779/CJGE202102004

地震作用下黄土边坡震陷破坏的动力离心模型试验研究

邵 帅¹, 邵生俊^{*1, 2}, 李 宁^{1, 2}, 张 彬¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究黄土边坡地震响应机制, 以兰州地区典型边坡为原型, 设计并完成了几何比尺 1:20 的原状黄土边坡动力离心模型试验。系统地研究了黄土边坡的地震动力响应特性、黄土边坡的稳定性和震陷变形规律。表明黄土边坡的加速度放大效应随坡高呈非线性增大变化, 且在坡体顶部到达最大; 边坡坡面的动力放大效应大于坡体内的动力放大效应; 边坡断面内坡肩下动力放大效应大于坡中下动力放大效应。强震作用下黄土边坡破坏形式表现为坡顶有明显的震陷下沉, 坡顶、坡肩及坡面出现大量的震动裂隙。由于坡肩及破面震陷变形, 以及坡体内震动裂缝发展, 边坡中下部坡面出现挤出、隆起变形, 并向临空面方向产生移动。坡体内震动裂缝发展形成了潜在滑移面, 为边坡产生整体滑移提供了条件。

关键词: 离心机振动台; 原状黄土边坡; 地震动响应; 加速度放大系数; 震陷变形

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)02-0245-09

作者简介: 邵 帅(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事黄土力学与土动力学方面的研究工作。E-mail: 315602024@qq.com。

Dynamic centrifugal model tests on seismic subsidence of loess slopes under earthquake action

SHAO Shuai¹, SHAO Sheng-jun^{1, 2}, LI Ning^{1, 2}, ZHANG Bin¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The dynamic centrifugal model tests on the loess slope samples with geometric scale of 1:20, which are taken from a typical slope in Lanzhou, are designed and carried out. The characteristics of seismic dynamic response, stability and deformation of the loess slope are studied systematically. The results show that the acceleration amplification effect of the loess slope increases nonlinearly with the slope height and reaches the maximum at the top of the slope. Under the action of strong earthquakes, the failure of the loess slope shows that there is obvious subsidence at the top of the slope, and a large number of fractures and fissures appear at the shallow stratum, shoulder and slope surface. Due to the seismic subsidence deformations at the shoulder and surface of the slope and the development of the fractures and fissures in the slope, uplift deformation appears at the middle and lower parts of the slope, and they move towards the direction of the slope surface. The potential slip surface is formed by the development of fractures and fissures in the slope, which provides the conditions for the overall slip of the slope.

Key words: centrifuge shaking table; intact loess slope; earthquake dynamic response; acceleration amplification factor; seismic subsidence

0 引言

中国黄土地区多处于高烈度地区, 黄土高原地区是一个多地震诱发灾害的地区, 地震作用常会造成巨大损失。自 2008 年汶川地震以来, 中国西部地区发生了多次中强震, 并诱发了多处滑坡灾害, 造成经济损失和人员伤亡^[1-2], 严重威胁人们的生产生活。黄土边坡震动失稳是常见的地震灾害。开展边坡地震响应力学特性研究, 提出有效的防控措施是极为迫切的。

边坡地震问题一直是岩土工程界所关注的焦点^[3-4]。早期边坡动力学的研究主要集中于其动力稳

定性, 常用的分析方法有拟静力法^[5-6]、Newmark 滑块位移法^[7]和有限元法^[8]等。然而, 对黄土边坡地震响应多数以数值模拟方法进行研究, 涉及的物理模型试验研究较少。言志信等^[9-10]通过有限差分法研究了一般黄土边坡的地震动响应和变形破坏特征。邓龙胜等^[11]采用有限元数值模型, 研究了黄土边坡位移、速度和加速度的动力响应影响。由于黄土动力特性的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11572245)

收稿日期: 2020-03-08

*通信作者 (E-mail: sjshao@xaut.edu.cn)

复杂性，人们开始通过模型试验研究黄土工程的动力响应、变形特征和动力稳定性。

目前，国内外边坡地震稳定性方面的研究手段主要包括强震实测与震害调查、理论分析与数值模拟、物理模型试验等^[13]。其中物理模型试验主要分为振动台模型试验以及动力离心模型试验。重力加速度条件下土体的振动台试验无法模拟实际自重应力场情况，造成试验结果与实际动力响应有较大偏差。而离心模型试验可以模拟原型自重应力，更好地再现原型变形与破坏机制，便于模拟复杂土工程问题。因此，采用动力离心模型试验可揭示实际自重应力条件下的动力响应，研究土体动力变形和破坏的发展过程^[14]。

自 20 世纪 80 年代以来，许多国家建造了各类离心机振动台进行土工动力离心模型试验。Kutter 等^[15]讨论了地震强度对放大效应的影响。Taboada 等^[16]研究了液化条件下边坡的动力响应特征。Ng 等^[17]探讨了饱和风化花岗岩残积土坡的地震响应特性。Brennan 等^[18]通过离心机振动台试验，定量分析坡顶加速度的放大效应。Wang 等^[19]通过图像测量技术分析了抗滑桩支护作用的抗震效应。翁效林等^[20]通过研究离心振动试验，研究分析了黄土地基的震陷特征。涂杰文等^[21]提出了边坡的加速度响应规律是表征地震惯性力引发崩塌滑坡震害、合理确定地震影响系数的基础。目前，振动台模型试验技术在砂土地基、黄土地基以及黏土边坡的应用较多。

王兰民等^[22]通过振动台试验研究了黄土边坡在地降雨与震动作用下的动力响应和渐进破坏特征。陈金昌等^[23]通过振动台模型试验讨论黄土边坡在地震荷载作用下的动力响应规律与破坏机制；叶帅华等^[24]完成框架锚杆支护重塑黄土边坡的大型振动台模型试验，探讨了地震作用下支护边坡的动力响应规律，并对其抗震性能进行了评价；张泽林等^[25]在离心机振动台上研究了重塑黄土边坡的地震动放大效应与变形模式。已有的黄土边坡模型试验研究主要包括常重力加速度条件下大型振动台模型试验和离心加速度（10 倍以上重力加速度）条件下振动台模型试验。针对重塑黄土边坡动力离心模型试验已经开展了研究，而针对天然沉积原状黄土的动力离心模型试验还属于空白区。

基于这些现状，为了研究原状黄土边坡震动变形发展直至破坏过程中的动力响应特征与失稳状态。本文以兰州地区典型边坡为研究对象（图 1），采用离心机振动台，通过在边坡土体中预埋传感器和设置坡面位移标记点的监测技术，对黄土边坡模型施加地震波，进行了动力离心模型试验，获得了随机振动作用下原状黄土边坡不同部位位移及加速度的响应，以及原状

黄土边坡的动变形发展和破坏形式。

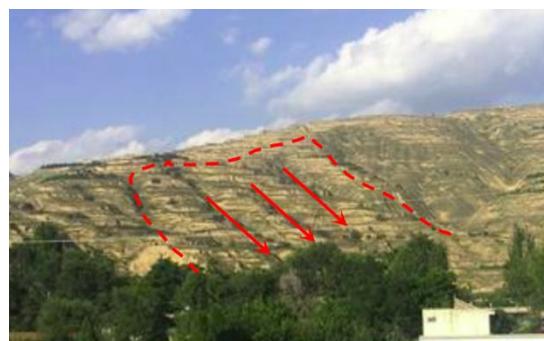


图 1 兰州黄土边坡

Fig. 1 Loess landslide in Lanzhou area

1 试验概况

1.1 试验原理

黄土边坡的动力模型试验是在中国水利水电科学研究院离心机振动台试验仪上完成的。该离心机转动半径为 5.03 m，最大离心加速度为 300g，最大有效负载为 15 kN，有效容量 450 g·t，试验吊篮尺寸为 1.5 m×1.0 m×1.5 m（长×宽×高）。其配套的振动台尺寸为 1.2 m×0.8 m，振动频率为 10~300 Hz，最大振动加速度可达 50g，最大水平位移 6 mm。

土工离心试验利用离心机旋转产生离心力模拟原型土体自重应力作用。在原型与模型几何相似的前提下，通过控制离心加速度保持原型与模型的力学特性相似，进而由模型试验的力学响应揭示原型土体的应力应变特性及破坏机理。试验以兰州地区典型黄土边坡为研究对象，原型黄土边坡大多高十余米，因此选取几何相似比为 1:20，即在离心机加速度达到 20g 时模拟原型边坡自重应力场，然后，由振动台开始输入震动加速度时程变化。具体相似参数见表 1。

表 1 离心机振动台模型试验相似比

Table 1 Similitude ratios of parameters of shaking table in model tests

类型	参数名称	量纲	相似比(模型/原型)
几何尺寸	长度 l	L	1/20
	位移 s	L	1/20
材料属性	密度 ρ	ML^{-3}	1
	重度 γ	$ML^{-2}T^{-2}$	20
	黏聚力 c	$ML^{-1}T^{-2}$	1
	内摩擦角 φ	1	1
	应力 σ	$ML^{-2}T^{-2}$	1
动力特性	应变 ε	1	1
	重力加速度 g	LT^{-2}	20
	加速度 a	LT^{-2}	20
	时间 t	T	1/20
	频率 f	T^{-1}	20

1.2 物理模型制作

边界效应是所有动力模型试验中不可避免的问题。以往大多采用刚性模型箱四壁涂抹凡士林, 使侧壁边界无剪切应力作用, 但侧壁边界的法向约束作用抑制了模型土体振波传递过程的相对变形反应。此次试验采用层状剪切模型箱, 箱体尺寸为 $745\text{ mm} \times 350\text{ mm} \times 510\text{ mm}$ 。樱井彰雄^[26]指出层状剪切模型箱可更好地消除模型试验的边界效应, 并且在满足土体层状变形方面具有更好的特性。因此, 在动力模型试验中, 通过剪切箱模拟模型土体的边界, 可以更好地模拟地震波传递、动力剪切变形响应, 动力剪切作用扰动土结构破坏的震陷, 以及边坡的变形破坏性状。

黄土的震陷变形是由于大孔隙疏松结构天然黄土遭受震动作用引起结构产生破坏, 土层产生显著附加沉降的响应。以往, 在重塑黄土的动力离心模型试验中, 由于填土边坡的干密度较大, 难以产生震陷变形力学效应。然而, 黄土边坡在遭遇地震作用时不仅会产生震陷变形, 而且会产生临空面的水平向位移, 甚至滑移导致滑坡。本文试验将采取自兰州实际场地天然黄土试样, 按照剪切箱尺寸, 切削制备成一定坡比的原状黄土边坡模型。然后, 用长柄微型洛阳铲在模型边坡土体上钻孔, 按照预定位置埋置加速度传感器, 同时, 测试天然黄土的含水率。试样的物理性质如表2所示。

表2 黄土土样的基本物理性质指标

Table 2 Basic physical properties of loess samples

天然密度 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率 /%	干密度 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
1.38	8.2	1.27	28.2	17.2	11

为了达到实际边坡黄土的含水率11%, 采用低湿度模型土样表面滴水, 水膜转移法达到平衡来控制含水率。制备试样由塑料膜密封, 静置48 h, 达到边坡模型试样土体内水分分布均匀。

模型边坡土体制作步骤为: ①拆开土样运输箱, 削去表层与四周的松散填土; ②切削土样内置于立方体剪切箱; ③在土体两侧画出模型边坡的坡型, 再切削制备; ④土样表面滴水, 补充配置含水量所需水量; ⑤塑料膜密封试样。静置48 h。将制备好的模型边坡土体, 用塑料薄膜分别贴放在顶面与侧壁, 预防试验振动过程有土颗粒在剪切层滑动时落入滚轮装置, 影响试验顺利进行。将剪切箱分层套装在模型土体上, 并用四根螺杆固定分层剪切箱壁于底板上便于模型吊装。制作边坡模型如图2, 3所示。



图2 制作边坡模型

Fig. 2 Preparation of slope model

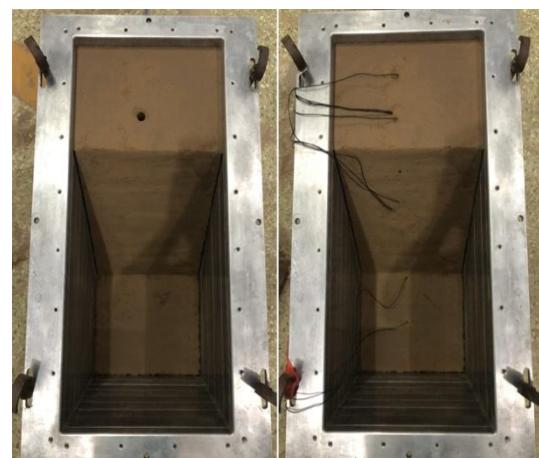


图3 边坡模型图

Fig. 3 Slope model

在制备的边坡模型上, 用直径2 cm的微型洛阳铲竖向钻孔。埋置如图4所示加速度传感器A6~A15。加速度传感器监测边坡模型的动力响应规律。模型箱外侧设置1个加速度传感器A0, 可以监测输入加速度。在模型箱顶部设置了4个激光位移传感器, 可以监测模型边坡的竖向变形。

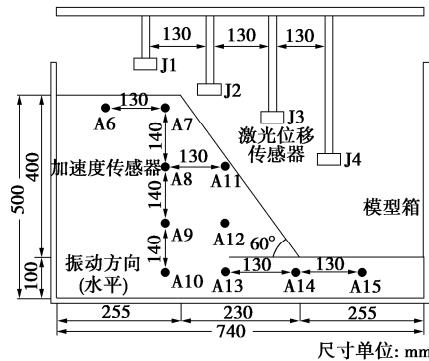


图4 边坡模型传感器布设

Fig. 4 Slope model and arrangement of acceleration transducers

1.3 地震动输入

试验中动力输入选取了紫坪铺站台记录的2008年5·12汶川大地震地震波, 峰值加速度 $\text{PGA} \approx 0.2\text{g}$ (见

图 5)。这是由于黄土场地地震波通过较大震中距基岩传递和黄土覆盖层传递, 软弱夹层和黄土层具有滤波作用, 消除了高频成分波。且不同黄土场地覆盖土层滤波和放大效应不同, 具有不同的黄土场地地震波。因此, 为了揭示较大频幅范围黄土边坡的震动响应, 选择紫坪铺地震波作为输入波。将安装模型的离心机启动直至加速度达到 $20g$, 稳定运转 40 s 后, 再通过振动台输入地震动力作用, 将图 5 地震波加速度振幅的幅值分别调整至 $0.3g$ 与 $0.5g$, 分别对两个相同尺寸模型输入不同地震波进行振动试验。测试振动试验中坡体内各点的峰值加速度 PGA(A6)~PGA(A15) 及模型箱外侧参照点峰值加速度 PGA(A0)。土体内各点加速度最大峰值与模型箱底板加速度最大峰值的比值反映了边坡加速度响应的放大效应。同时, 通过激光位移传感器与坡面摄像头可以监测边坡的位移反应。

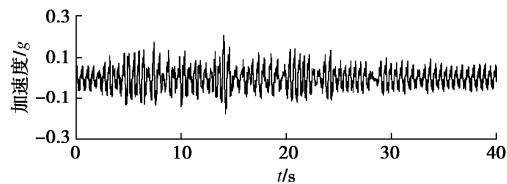


图 5 试验输入地震波 (峰值加速度 $PGA=0.2g$)

Fig. 5 Input seismic waves (peak acceleration of $0.2g$)

2 原状黄土边坡加速度响应规律

地震动作用下边坡的加速度响应实质上是其变形位移响应及变形破坏失稳的结果。通过黄土边坡离心模型试验, 由埋置于边坡内不同位置的加速度传感器 (A6~A15) 可监测得到坡体不同位置的水平方向动力加速度响应的时程曲线, 进而, 可确定各点的最大峰值加速度 (PGA) 与振动台台面的最大峰值加速度 (A0)。边坡上不同位置的最大峰值加速度与输入台面的最大峰值加速度比反映了动力放大系数。地震加速度输入最大峰值分别为 $0.3g$ 和 $0.5g$ 时, 振动台台面和坡体内各点的加速度反应时程曲线如图 6, 7 所示。据此, 分析了黄土边坡的动力放大效应特征。

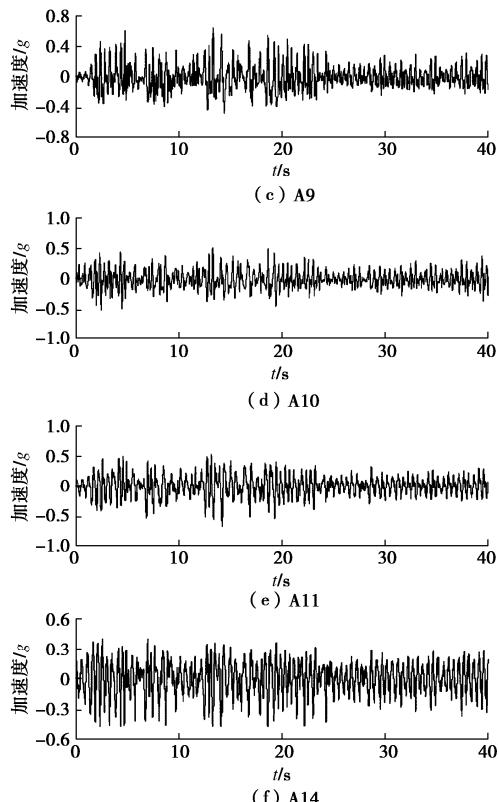
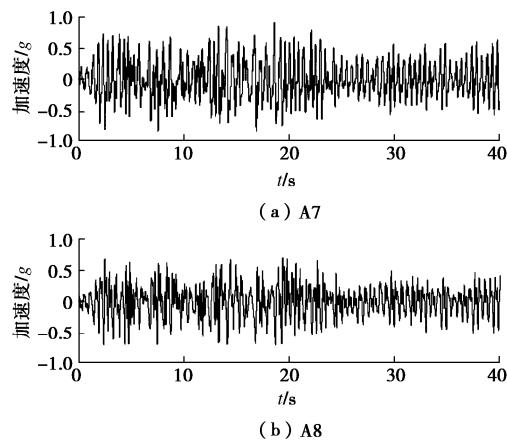
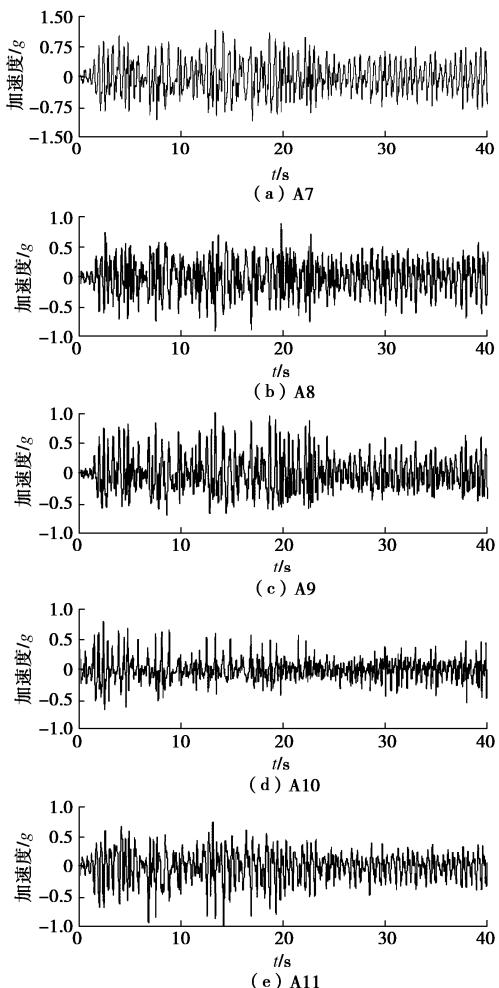


图 6 边坡的加速度时程曲线($PGA=0.3g$)

Fig. 6 Time-history curves of acceleration of slopes ($PGA=0.3g$)



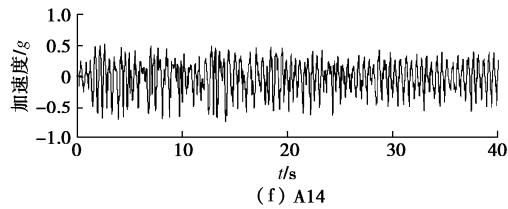


图 7 边坡的加速度时程曲线(PGA=0.5g)

Fig. 7 Time history curves of acceleration of slopes (PGA=0.5g)

2.1 边坡坡面加速度响应放大效应

黄土边坡在地震动激振作用下坡面的加速度放大系数规律如图 8 所示, 图 8 (a) 为时程曲线最大峰值为 $0.3g$ 的坡面放大系数变化规律, 图 8 (b) 为时程曲线最大峰值为 $0.5g$ 的坡面放大系数变化规律。表明峰值加速度 $0.3g$ 作用下, 坡面的放大系数随高度的增加而单调增大, 在坡顶 (A7) 达到最大, 最大放大系数为 2.58; 峰值加速度 $0.5g$ 作用下, 坡面的放大系数随高度的增加而增大, 到坡顶而减小, 最大放大系数为 2.12。在坡脚处的加速度放大系数均近似为 1.3, 放大效应较小。表明边坡坡面的动力响应从坡脚到坡顶逐渐增加, 并且, 在 $0.5g$ 强震作用下, 边坡坡顶浅层土结构遭到破坏, 高强度动力剪切作用导致土层不均匀运动, 使其裂隙裂缝发展, 出现震裂和松动反应。因此, 坡顶出现放大效应减弱, 表现为加速度传感器 A7 处的放大系数小于加速度传感器 A6 处的放大系数。

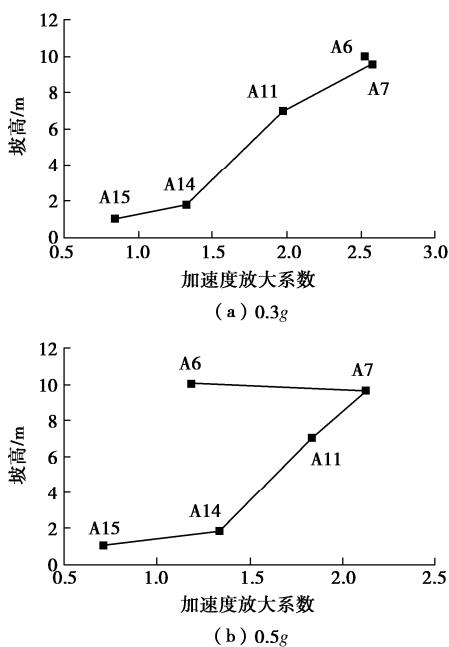


图 8 边坡坡面的放大系数

Fig. 8 PGA amplification characteristics at landslide surface

2.2 边坡剖面加速度响应规律

在输入加速度最大峰值分别为 $0.3g$, $0.5g$ 震动激振作用下, 黄土边坡剖面上加速度响应的放大系数规律如图 9 所示。震动激振作用下, 坡体内加速度放大

系数均随着高度的增大而增大, 其中, 最大峰值分别为 $0.3g$ 时, 坡肩的动力放大系数约为 2.6; 最大峰值分别为 $0.5g$ 时, 坡肩的动力放大系数约为 2.2。这种动力放大系数的变化规律与前人研究的结果相符合。同时, 也表明 $0.5g$ 震动激振作用下, 由于黄土遭到破坏而产生裂隙裂缝发育而变得疏松, 其放大系数相应的减小。

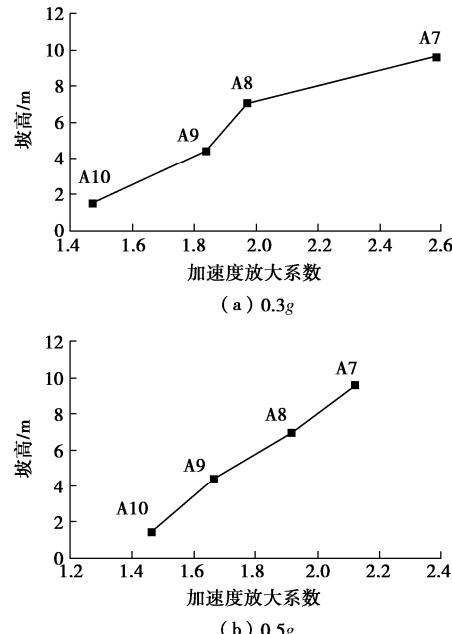


图 9 边坡剖面 PGA 放大规律

Fig. 9 PGA amplification characteristics at long section of slopes

2.3 激震最大峰值加速度对坡体动力响应的影响

分析坡肩、坡中铅垂线上黄土边坡内不同高度的加速度放大系数, 如图 10 所示。不同激震作用下, 坡肩、坡中铅垂线上各点的动力放大系数均随高度的增大而增大。在较大激震峰值加速度作用下, 动力剪切扰动土结构的作用强度较大, 促使土体软化, 刚度降低, 引起土体传递动力剪切作用的效应减小。这种动力响应变化规律是由于: 一方面较大动力剪切作用导致土结构产生屈服破坏更严重, 塑性变形发展越明显。塑性屈服变形削弱了土体的刚度, 且土的阻尼随较大动剪应力作用下动剪应变的增大而增大, 也会影响土体的动力响应, 从而引起边坡不同位置的加速度放大效应减小。另一方面随着激震随时间的累积作用, 边坡土体屈服破坏程度逐步增大, 动力剪切累积作用下土结构破损的发展, 土体产生软化松弛。尤其是坡顶浅层土体压缩应力小, 震动裂缝和土结构破损更明显。地震动的往返剪切作用促使浅层土体裂隙裂缝发育, 明显地削弱了剪切效应的传递, 表现为坡顶浅层土的放大系数明显减小。可见, 强震作用下黄土产生动力剪切屈服塑性变形, 使得土体刚度减小, 明显影响了边坡的动力放大效应。

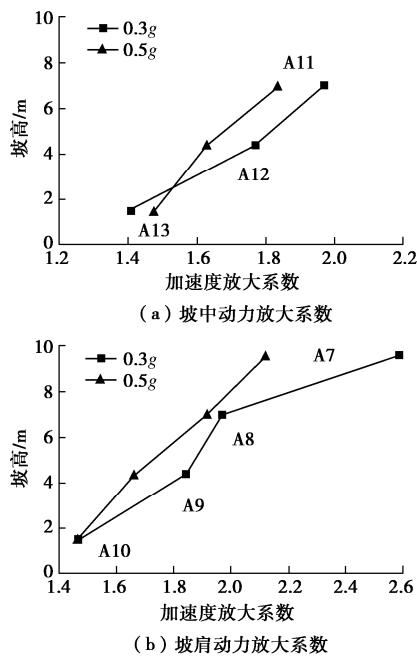


图 10 不同振幅下黄土边坡 PGA 放大规律

Fig. 10 PGA amplification characteristics of loess slopes under seismic waves with different amplitudes

3 地震动边坡变形破坏特征

将 4 个激光位移传感器分别对应坡顶 J1、坡面上部 J2、坡脚 J3 以及坡底 J4 布置，监测坡体不同部位的竖向变形。在离心机加速度升高运动过程，模型边坡不同部位的竖向变形如图 11 所示，坡顶出现约为 2 cm 的固结沉降，坡面上部未产生竖向变形，坡脚和坡底则出现了竖向隆起变形约 0.4 cm。当地震波作用时，黄土边坡产生震动变形，不仅与动力作用强度有关，还与黄土的含水率相关。兰州地区黄土边坡土的天然含水率一般在 12% 左右。即使黄土具有低含水率，只要动力作用强度较大时，也会引起黄土结构破坏，产生永久变形。当激震峰值加速度为 0.3g 时，动力变形如图 12 (a) 所示。在震动历时 14 s 之前，边坡并未发生明显变形。在震动历时 14 s 之后，坡顶开始出现沉降变形，并很快达到稳定值 2 cm；坡面上部沉降变形逐渐发展，最终产生约 1.5 cm 沉降；坡脚出现约 1.0 cm 的隆起变形；坡底未产生竖向变形。震后坡面相对于初始坡面产生趋缓变化变形。同时，震后坡顶、坡肩、坡面均出现明显裂隙裂缝发育。当激震峰值加速度为 0.5g 时，动力变形如图 12 (b) 所示。在震动历时 14 s 之前，边坡并未发生明显变形。在震动历时 14 s 之后，坡顶开始出现沉降变形，很快达到稳定值 4 cm，之后逐渐发展到 5 cm；坡面上部沉降变形逐渐发展，最终产生约 1.5 cm 变形；坡脚出现约 1.5 cm 的隆起变形；坡底基本未产生竖向变形。震后坡面相对于初始

坡面

也产生趋缓变化变形。同时，震后坡顶、坡肩、坡面均出现更加明显裂隙发育。激震峰值加速度 0.5g 与 0.3g 作用下模型边坡的动力变形响应比较，0.5g 作用下坡顶产生了约 3 cm 附加沉降变形，边坡土体与模型箱接触面处的附加沉降变形更大；边坡土体的动力剪切屈服塑性软化明显发展，坡顶浅层土的土结构破损、裂隙裂缝发育更突出，导致坡顶浅层土的剪切波传递作用效应减小，动力放大系数减小。不同强度激震作用下，模型剪切箱内壁接触面处土体松动但并未产生分离，剪切箱能够有效地传递地震剪切波。并且，内壁附近坡顶的竖向沉降更突出。

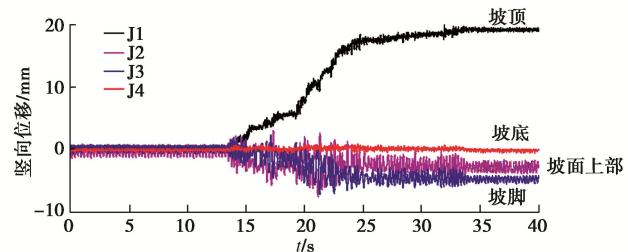


图 11 离心加速 (20g) 旋转作用下模型边坡的固结变形

Fig. 11 Consolidation deformations of model slope under centrifugal acceleration (20g)

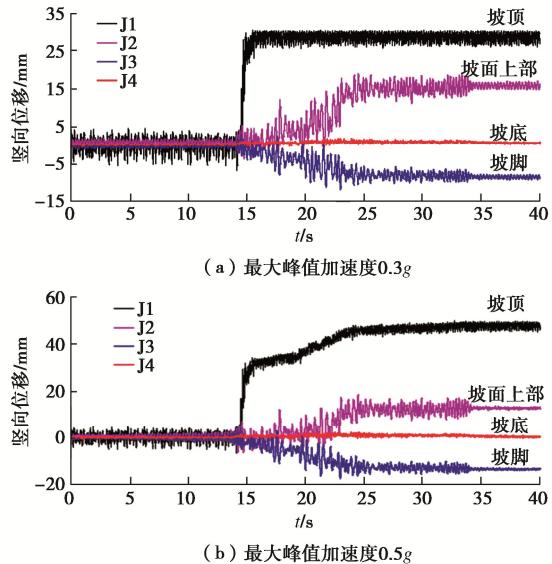


图 12 边坡竖向变形的时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of vertical deformation of slopes

震后变形表明，坡中以下坡面相对于初始坡面的竖向沉降变形很小或隆起；坡中以上坡面相对于初始坡面的竖向沉降变形发展显著；坡面下部和上部的沉降差引起了错位变形缝。震后坡面与震前坡面比较，坡中上部向内的位移和坡中下部向外的位移面积近似相等。并且，边坡坡面坡中上部和下部运动位移方向发生显著变化，表明坡体未产生滑动位移。因此，动

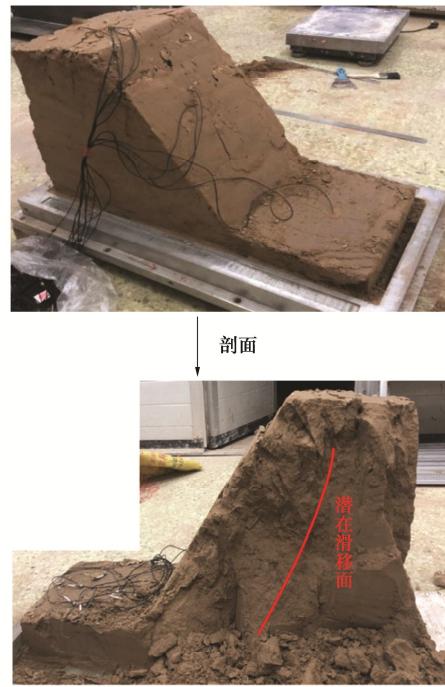
力剪切作用下, 模型边坡坡顶竖向沉降变形实质上就是震陷变形。可见, 边坡整体变形构成了由坡顶至坡脚的沉降到挤出的滑移运动趋势。

天然沉积黄土具有显著的结构性及构造裂隙结构

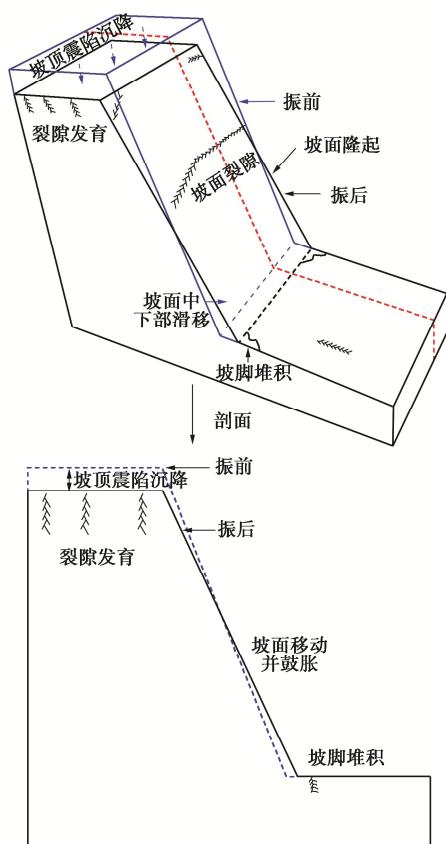
特征。黄土边坡土体变形破坏特征如图 13 所示。不同强度激震作用下边坡均出现大量的裂隙裂缝, 且由于动力放大效应, 边坡顶部较底部的动力剪切变形更加明显; 边坡内部分布许多动力变形响应的裂隙, 地震



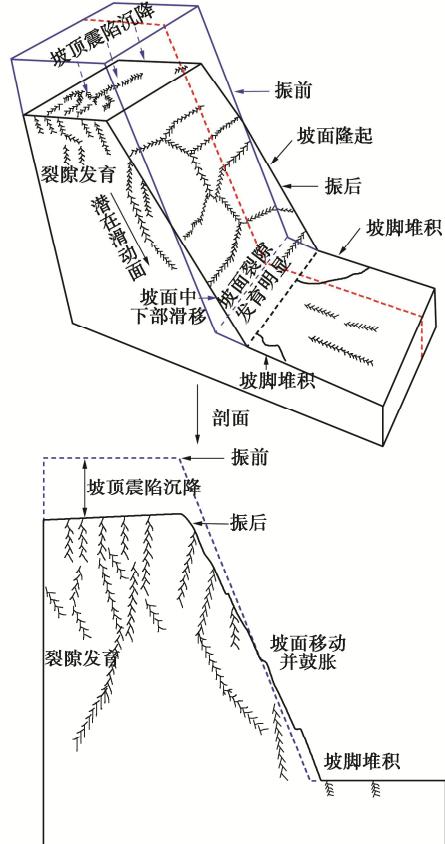
(a) 0.3g 地震作用下边坡变形破坏照片



(b) 0.5g 地震作用下边坡变形破坏照片



(c) 0.3g 地震作用下边坡变形破坏示意图



(d) 0.5g 地震作用下边坡变形破坏示意图

图 13 震动作用下黄土边坡的破坏特征

Fig. 13 Failure characteristics of loess slopes under earthquake action

作用下原状黄土边坡的变形破坏特征为：坡顶、坡肩、坡面、坡底均由于剪切作用形成拉张裂隙裂缝，坡顶土结构破坏产生软化松弛；边坡产生明显的震陷变形，临空面坡体上部震陷与下部隆起构成了滑移变形运动形态。0.5g 激震作用下坡顶产生约 5 cm 的震陷变形，坡体震陷变形和裂隙裂缝发育促使临空面下部坡体产生隆起变形，较 0.3g 激震作用下的震陷变形和隆起变形更明显。不同强度激震作用下边坡动剪切变形发展，均引起黄土竖向构造裂隙裂缝产生动力放大效应，且具有演变为潜在滑移面的变化趋势。0.5g 激震作用下黄土初始结构裂隙裂缝的动力响应发展演变较 0.3g 激震作用更突出，呈现更加明显的倾向坡脚的滑移面。

4 结 论

本文通过兰州原状黄土边坡的动力离心模型试验，揭示了 0.3g, 0.5g 激震作用下原状黄土边坡的地震动响应特征及变形破坏形式，得到以下 5 点结论。

(1) 黄土边坡坡面的地震动响应加速度放大系数由坡脚至坡顶逐渐增大。在 0.3g~0.5g 峰值加速度激震作用下，坡顶的动力放大系数在 2.2~2.6；边坡横断面内坡肩、坡中铅垂线上各点的动力放大系数较坡面的小。

(2) 由于 0.5g 激震作用的动剪应力较 0.3g 激震作用的大，使得较大动剪应力累积作用引起黄土结构屈服破坏的软化效应更加突出，土体刚度衰减更大，抑制了坡体内剪切波的传递效应。从而使 0.3g 激震作用下坡体的动力放大系数较 0.5g 激震作用下的动力放大系数大。

(3) 随着激震作用强度的增大，原状黄土边坡的震陷变形发展增大，坡体内裂隙裂缝的动力响应发展更明显，坡面上部震陷变形与坡面下部隆起变形的错动位移产生的裂缝发展更大。临空面坡体上部震陷与下部挤出、隆起构成了滑移变形运动形态。

(4) 激震作用下，坡顶及坡面出现大量从外到内的张拉裂隙裂缝，且激震作用强度越大，裂隙裂缝发展越显著。黄土边坡初始裂隙结构动力响应发展，可能形成潜在滑移面。由于坡顶浅层土压缩应力较小，土结构屈服和裂缝发展，使得浅层土产生松动软化。

(5) 较大激震作用下动力剪切引起土结构的破坏更突出，坡顶震陷变形发展较大；边坡动力响应的裂隙裂缝发展更明显；坡体震陷变形和裂隙裂缝发展促使坡面下部临空面土体产生更加明显的挤出、隆起变形，产生了倾向坡脚的滑移面。

致 谢：感谢中国水利水电科学研究院离心机实验室张雪东博

士、胡晶博士、张紫涛博士在试验中给予的帮助与指导。

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 Run-qi, LI Wei-le. 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] 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.
- [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. (in Chinese))
- [4] MAINANST G, CHAMBON G, JONGMANS D, et al. Shear-wavevelocity drop prior to clayey mass movement in laboratory flume experiments[J]. Engineering Geology, 2015, 192(9): 26~32.
- [5] SEED H B. A method for earthquake-resistant design of earth dams[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(1): 13~41.
- [6] 殷跃平, 王文沛. 论滑坡地震力[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 586~600. (YIN Yue-ping, WANG Wen-pe. Researches on seismic landslide stability analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 586~600. (in Chinese))
- [7] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Géotechnique, 1965, 15(2): 139~160.
- [8] 刘立平, 雷尊宇, 周富春. 地震边坡稳定分析方法综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2001, 20(3): 83~88. (LIU Li-ping, LEI Zun-yu, ZHOU Fu-chun. The evaluation of seismic slope stability analysis methods[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2001, 20(3): 83~88. (in Chinese))
- [9] 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-xin, CAO Xiao-hong, ZHANG Liu-ping, et al. Numerical analysis of loess slope dynamic response under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 610~614. (in Chinese))

- [10] 言志信, 郭斌, 张学东, 等. 黄土边坡动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(5): 629–635. (YAN Zhi-xin, GUO Bin, ZHANG Xue-dong, et al. Dynamic response analysis of loess slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(5): 629–635. (in Chinese))
- [11] 邓龙胜, 范文. 黄土边坡动力响应的影响效应研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 483–490. (DENG Long-sheng, FAN Wen. Research on dynamic response effects of loess slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 483–490. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] 孙志亮, 孔令伟, 郭爱国. 风干堆积体边坡地震响应的动力离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 36(9): 2102–2112. (SUN Zhi-liang, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Dynamic centrifuge tests on seismic responses of air-dried deposit slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 36(9): 2102–2112. (in Chinese))
- [14] BRENNAN A J, THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G. Evaluation of shear modulus and damping in dynamic centrifuge tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1488–1497.
- [15] KUTTER B L, JAMES R G. Dynamic centrifuge model tests on clay embankments[J]. Géotechnique, 1989, 39(1): 91–106.
- [16] TABOADA URTUZUSTEGU V M, MARINE Z, RAMIREZ G, et al. Centrifuge modeling of seismic behavior of a slope in liquefiable soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9/12): 1043–1049.
- [17] NG C W W, LI X S, VAN LAAK P A, et al. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uniaxial and bi-axial earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(4): 305–318.
- [18] BRENNAN A J, MADABHUSHI S P G. Amplification of seismic accelerations at slope crests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(5): 585–594.
- [19] 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.
- [20] 翁效林, 熊元克, 裴凯. 黄土震陷变形特征的离心模型试验研究[J]. 矿物学报, 2006, 26(4): 460–464. (WENG Xiao-lin, XIONG Yuan-ke, PEI Kai. Study of loess seismic subsidence deformation characteristics by centrifuge scale-down test[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(4): 460–464. (in Chinese))
- [21] 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): 282–290. (TU Jie-wen, LIU Hong-shuai, TANG Ai-ping, et al. Acceleration response characteristics of colluvium landslide based on centrifugal shaking table model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 282–290. (in Chinese))
- [22] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1287–1293. (WANG Lan-min, PU Xiao-wu, WU Zhi-jian, et al. Shaking table tests on dynamic response of loess slopes under coupling effects of earthquakes and rainfalls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1287–1293. (in Chinese))
- [23] 陈金昌, 王兰民, 王平, 等. 基于振动台试验的纯黄土边坡动力响应研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2): 529–535. (CHEN Jin-chang, WANG Lan-min, WANG Ping, et al. Dynamic response of loess based on the shake table test[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 529–535. (in Chinese))
- [24] 叶帅华, 赵壮福, 朱彦鹏. 框架锚杆支护黄土边坡大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4240–4248. (YE Shuai-hua, ZHAO Zhuang-fu, ZHU Yan-peng. Large-scale shaking table experiment of loess slope supported by frame anchors[J]. Rock and Soil Mechanic, 2019, 40(11): 4240–4248. (in Chinese))
- [25] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震作用下黄土滑坡加速度深度放大效应及震后变形模式研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 102–120. (ZHANG Ze-lin, WU Shu-ren, WANG Tao, et al. Study on acceleration depth amplification effect and deformation model of loess landslide under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 102–120. (in Chinese))
- [26] 樱井彰雄. 地盘耐震学[M]. 东京: 丸善出版社, 1999. (SAKURAI A. Seismic Ground Engineering[M]. Tokyo: Tokyo Maruzen Publication, 1999. (in Chinese))