冉俊,王涛,王磊,等.地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡地震动力响应及变形试验研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1489-1500.DOI:10.20000/j.1000-0844.20260120001

Ran Jun, Wang Tao, Wang Lei, et al. Experimental study on seismic dynamic response and deformation of loess-mudstone slopes cross-cut by surface faults[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1489-1500. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20260120001

# 地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡地震动力响应及变形试验研究

冉 俊[1,2], 王 涛[3,4,5], 王 磊[1,2], 王浩杰[3,4,5], 台大平[3,4,5],
徐 骁[1,2], 刘 帅[3,4,5]

(1. 应急管理大学 防灾减灾工程学院,河北 廊坊 065201;
2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室,河北 廊坊 065201;
3. 中国地质科学院 地质力学研究所,北京 100081;
4. 自然资源部 活动构造与地质安全重点实验室,北京 100081;
5. 自然资源部 陕西宝鸡地质灾害野外科学观测研究站,陕西 宝鸡 721001)

**摘要**: 为了揭示断裂对黄土地区斜坡地震动力响应的影响,基于对甘肃陇东南地区断裂控坡灾害的野外调查,设计倾角70°的地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡概化模型,开展比例尺为1∶20的振动台模型试验,对斜坡的地震动力响应特征开展研究。试验结果表明:在坡表、风化壳以及坡体内部的竖直方向上总体呈现水平加速度放大系数($AF_{PGA}$)的"趋高效应"。在坡表、风化壳及坡体内部竖直方向的加速度放大效应整体上呈现出"两组分化"特征,表明其与斜坡非线性损伤的特征有关。在同一高程上,斜坡坡肩处断裂带上盘的$AF_{PGA}$大于下盘,呈现上盘放大效应;风化壳地形凸出部位断裂带内的$AF_{PGA}$高于上、下盘,表明断裂带内的放大效应更为显著。该斜坡的变形破坏过程为:首先沿断裂带向两侧形成拉张裂隙并逐渐扩张,继而坡脚处轻微隆起,最后形成从坡顶后方延伸至坡面中部的潜在滑动面。其中,断裂带上盘最终产生的裂隙规模和数量均明显高于下盘。研究结果进一步丰富了断裂带斜坡的地震动力响应特征,可为该类斜坡的地震稳定性评价和灾害防治提供参考。

**关键词**: 黄土-泥岩斜坡;断裂;风化壳;动力响应;振动台;放大效应

**中图分类号**: TU435 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2026)06-1489-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20260120001

**收稿日期**:2026-01-20

**基金项目**:自然科学基金项目(41572313);中国地质调查项目(DD20221738;DD20230600204);国家重点研发计划(2022YFC3003505);中央高校基本科研业务费专题项目(ZY20215125)

**第一作者简介**:冉 俊(1996-),硕士研究生,主要从事岩土地震工程与地震滑坡研究。E-mail: 1015968828@qq.com。

**通信作者**:王 涛(1982-),博士,研究员,主要从事地质灾害致灾机理与风险评估防控研究。E-mail: wangtaoig@cags.ac.cn。

# Experimental study on seismic dynamic response and deformation of loess-mudstone slopes cross-cut by surface faults

Ran Jun[1,2], Wang Tao[3,4,5], Wang Lei[1,2], Wang Haojie[3,4,5], Tai Daping[3,4,5], Xu Xiao[1,2], Liu Shuai[3,4,5]

(*1.School of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, University of Emergency Management, Langfang 065201, Hebei, China;*
*2.Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Langfang 065201, Hebei, China;*
*3.Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
*4.Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
*5.Observation and Research Station of Geological Disaster in Baoji, Shaanxi Province, Ministry of Natural Resources, Baoji 721001, Shaanxi, China*)

**Abstract**: To determine the influence of a fault on the seismic dynamic response of loess slopes, a generalized loess-mudstone slope model cross-cut by a surface fault dipping at 70° was designed based on field investigations of fault-controlled slope disasters in southeastern Gansu Province. The slope was then tested using a shaking table model at a 1∶20 scale to examine its seismic dynamic response characteristics. The test results indicate that the amplification factor of horizontal peak ground acceleration ($AF_{PGA}$) generally exhibits an "elevation effect" along the vertical direction on the slope surface, in the weathering crust, and inside the slope body, whereas the vertical acceleration amplification across these same zones instead shows a "two-group differentiation" pattern, correlated with the nonlinear damage characteristics of the slope. At the same elevation, $AF_{PGA}$ of the hanging wall at the slope shoulder is larger than that of the footwall, demonstrating a hanging-wall amplification effect, and this effect is even more pronounced within the fault zone itself, where $AF_{PGA}$ at the convex parts of the weathering crust exceeds that of both the hanging wall and the footwall. The deformation and failure process of the slope proceeds as follows: tensile cracks first form and gradually propagate away from the fault zone, followed by slight bulging at the slope toe, and finally a potential slip surface develops from the rear of the slope crest to the middle of the slope surface, with the final cracks in the hanging wall considerably larger in both scale and number than those in the footwall. These findings further enrich the understanding of the seismic dynamic response characteristics of fault-zone slopes and can provide a reference for seismic stability assessment and disaster prevention of such slopes.

**Keywords**: loess-mudstone slope; fault; weathering crust; dynamic response; shaking table; amplification effect

## 0 引言

我国黄土地区活动断裂分布广泛、地震频发，强震诱发大量的滑坡灾害给黄土区造成了巨大的人员伤亡和经济损失[1-4]。黄土-泥岩斜坡在黄土地区广泛分布，这类斜坡由古近系—新近系泥岩及其上覆第四系黄土构成，形成典型二元结构。在地震诱发作用下，此类斜坡容易失稳形成大型滑坡灾害[5-6]。例如：1654年天水南8级地震诱发了上百起黄土滑坡，其中紧邻发震断裂发育的海头村巨型滑坡滑移距离2 km，压埋附近村落数千户人家[7]；1920年宁夏海原8.5级地震，在Ⅷ度以上烈度区范围内黄土滑坡成群连片，死于黄土滑坡的人数高达10多万人，其中破裂穿越的蒿内特大型滑坡堵河形成堰塞湖灾害链[8]；1927年古浪8级地震诱发了大量黄土滑坡，其中沿地表破裂带发育的灯山庄大滑坡压埋灯山庄全部34户人家[9]。灾难性滑坡多与断裂带的结构和动力控制作用密切相关，断裂构造是控制地震滑坡启动和运动学的关键控制因素之一[10-11]。

围绕黄土-泥岩斜坡的地震动力响应特征，国内外学者开展了多维度的研究并取得系列成果。在无断裂影响的斜坡动力响应研究方面，学者们通过振动台试验、离心机试验结合数值模拟等方法，系统探究了斜坡动力响应规律、宏观破坏特性及影响因素。王会娟等[12]建立低角度黄土-泥岩斜坡振动台模型试验，并采用有限差分软件，分析了斜坡的动力响应规律和宏观破坏特性。马紫娟等[13]基于现场调查对黄土-泥岩斜坡在地震作用下的动力响应进行了数值分析。张泽林等[14]基于斜坡的离心机振动台试验和数值模拟分析，研究了地震波幅值对黄土-泥岩斜坡地震动响应的影响规律。张泽林等[15]基于斜坡的离心机振动台试验和数值模拟分析，研究了地震作用下黄土-泥岩斜坡动力响应特征。Zhang 等[16]通过离心振动台试验和数值模拟，分析了地震作用下黄土-泥岩斜坡的动力响应特征和加速度放大效应。Chen 等[17]通过对比振动台试验，研究了在地震荷载作用下高含水黄土-泥岩斜坡的动力响应特征。Chen 等[18]建立黄土-泥岩斜坡大型振动台试验，使用 Hilbert-Huang 变换方法在时间-频率-能量空间中研究了斜坡的动力响应特征。Feng 等[19]通过振动台试验，分析了黄土-泥岩斜坡在地震和降雨作用下的动力响应特征。在断裂等特殊结构面（带）对斜坡地震响应研究中，现有成果多集中于横切型断裂。贾向宁等[20]建立顺层断裂带横切型黄土-泥岩斜坡振动台模型试验，结合数值模拟，揭示其地震动力响应规律以及放大效应。余腾飞[21]建立不同倾角断裂带横切型黄土-泥岩斜坡大型振动台物理模型试验，揭示了斜坡的地震动力响应特征。Zhou 等[22]通过离心模型试验，研究了断层横切软硬夹层反倾斜坡模型的动力响应规律、变形演化及破坏模式。Huang 等[23]通过振动台试验和数值模拟，研究了地震荷载作用下断裂带横切型黄土-泥岩斜坡的动力响应特征。Wei 等[24]采用跨断层斜坡模型振动台试验，分析了不同逆断层角度对动力响应的影响。总体来看，当前研究已在黄土-泥岩斜坡动力响应特征及横切型断裂的影响机制方面积累了较为丰富的成果，但是现有研究多单独关注断裂或软弱夹层的作用，而对于纵切型断裂与泥岩风化壳结构叠加对黄土-泥岩二元结构斜坡动力响应的耦合影响研究相对匮乏；尤其针对地表断裂纵切型斜坡在强震作用下的动力响应特征、能量传递规律及变形破坏机制的相关研究更鲜有涉及，难以满足该类复杂结构斜坡地震稳定性研究的实际需求。

鉴于此，本文通过大型振动台模型试验，构建黄土、泥岩风化壳和泥岩三层复合结构斜坡，系统开展地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡的地震动力响应研究，旨在揭示其独特的动力响应特征与变形破坏模式，为黄土地区黄土-泥岩斜坡的地震稳定性评价及灾害防治提供参考。

## 1　试验概况

### 1.1　试验设备

本次实验在中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室的大型地震模拟振动台上进行（图 1），振动台台面尺寸为 3 m（边长）×3 m，最大模型载重为 20 t，频率范围为 0.4～80 Hz，满载时水平向最大加速度为 2.0$g$，水平向最大位移为 ±100 mm。试验选用刚性模型箱，在模型箱后侧壁内衬聚苯乙烯泡沫塑料板作为侧边界处理，底部用环氧树脂黏结一层碎石作为底部边界处理，以便降低边界效应[25]。




图 1　振动台试验系统图

Fig. 1　Shaking table test system

### 1.2　模型相似设计

基于研究团队对甘肃陇东南地区黄土-泥岩滑坡的野外调查、测绘与勘察，以及此前合作开展的横切型断裂带黄土-泥岩滑坡（侯家山滑坡）模型试验基础[20,23]，结合毗邻地段与侯家山滑坡岩性条件、斜坡结构一致的纵切型断裂带黄土-泥岩滑坡典型案例：王家庄滑坡为代表的一类纵切型滑坡[26]，以实际振动台试验条件进一步设计出本文的地表断裂带纵切型黄土-泥岩斜坡的概化模型（图 2）。该斜坡模型尺寸为：2.70 m×2.00 m×1.52 m（长×宽×高），断裂带纵切坡体，走向和坡向一致，倾角设计为 70°，断裂带厚度为 0.2 m，为错断第四系黄土的地表断裂带，斜坡下伏泥岩、中部泥岩风化壳，上

覆黄土,形成复合的三层岩土结构斜坡。

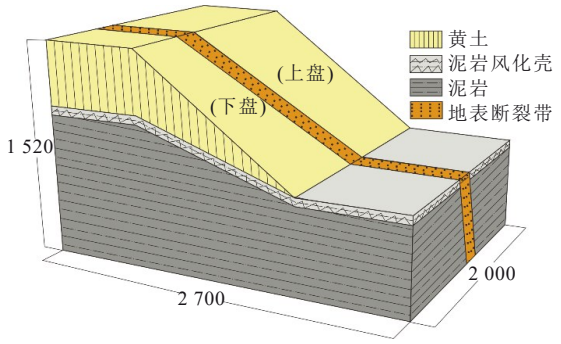



图 2 模型设计示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of model design (unit: mm)

试验基于振动台性能指标与模型箱尺寸,结合此前合作团队设计的侯家山滑坡模型相似比[20,23],按照模型与原型几何尺寸、材料及动力特性相似要求,以模型的长度、密度和弹性模量作为控制量,基于π定理和量纲分析法,导出其余物理量之间的相似关系[27-28],结果如表1所列。

**表 1 振动台模型试验相似关系**

**Table 1 Similarity relationships of shaking table model test**

| 类型 | 物理量 | 相似关系 | 相似常数 |
|---|---|---|---|
| 几何尺寸 | 长度 $l$(控制量) | $C_l=20$ | 20.0 |
| | 位移 $u$ | $C_u=C_lC_E$ | 20.0 |
| 材料特性 | 密度 $\rho$(控制量) | $C_\rho=1$ | 1.0 |
| | 弹性模量 $E$(控制量) | $C_E=C_lC_\rho$ | 20.0 |
| | 黏聚力 $C$ | $C_c=C_E$ | 20.0 |
| | 内摩擦角 $\varphi$ | $C_\varphi=1$ | 1.0 |
| | 应力 $\sigma$ | $C_\sigma=C_E$ | 20.0 |
| 动力特性 | 加速度 $a$ | $C_a$ | 1.0 |
| | 时间 $t$ | $C_t=C_l^{1/2}$ | 4.472 |
| | 速度 $v$ | $C_v=C_\rho^{-1/2}C_E^{1/2}$ | 4.472 |
| | 频率 $f$ | $C_f=1/C_t$ | 0.224 |

### 1.3 物理模型制作

斜坡模型相似材料的选取、配比及岩土体物理力学参数引用了此前团队对侯家山滑坡的模型材料制备方案[29-30],但滑坡结构形式进一步聚焦纵切型断裂带滑坡,具体的原型和模型材料的主要参数如表2所列。本次试验中的断裂带材料严格遵守力学参数的相似定律进行制备,为突出重点,对断裂破碎带的结构相似性未予考虑。近年来的模型实验成果中断裂带材料也采用了相似的处理,并得到了科学合理的试验结果[24,30-31]。

本次模型采用天然黄土、重晶石粉、砂和水模拟上覆黄土层,重晶石粉、石英砂、石膏、甘油和水模拟泥岩风化壳、泥岩和地表断裂带,其中重晶石粉和石英砂分别充当细骨料和粗骨料,石膏起到胶结作用,而甘油则发挥保水功能。根据土体密度与每层体积的关系,通过分层夯填方式,确保整体密度与设计值一致。

**表 2 原型和模型材料主要物理力学参数**

**Table 2 Main physical and mechanical parameters of prototype and model materials**

| 岩性 | 类型 | 重度 $\gamma$/(kN/m$^3$) | 黏聚力 $C$/kPa | 内摩擦角 $\varphi$/(°) | 弹性模量 $E$/MPa | 泊松比 $\mu$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 黄土 | 原型 | 18 | 8 | 20 | 8.2 | 0.36 |
| | 模型 | 18 | 0.4 | 20 | 0.41 | 0.36 |
| 泥岩风化壳 | 原型 | 18.5 | 18 | 26 | 80 | 0.30 |
| | 模型 | 18.5 | 0.9 | 26 | 4 | 0.30 |
| 泥岩 | 原型 | 21 | 40 | 30 | 211.8 | 0.32 |
| | 模型 | 21 | 2 | 30 | 10.59 | 0.32 |
| 地表断裂带 | 原型 | 20 | 20 | 20 | 105.8 | 0.32 |
| | 模型 | 20 | 1 | 20 | 5.29 | 0.32 |

### 1.4 测试内容及测点布设

本次试验主要关注地震作用下斜坡加速度响应和变形失稳模式,通过设置加速度监测点获取边坡关键位置的加速度分布特征,图3~5显示了边坡模型上设计的加速度传感器的具体分布情况。同时设有高速摄像机进一步捕捉斜坡的宏观和微观破坏特征,准确记录地震作用下斜坡变形失稳全过程。根据传感器所处的断裂带上下盘相对位置,一共布设了10组加速度传感器,下标H代表断裂带上盘,下标I代表断裂带内部,下标F代表断裂带下盘,如$A1_H$、$A1_I$、$A1_F$代表同一高程中在断裂带上盘、内部和下盘不同部位的A1加速度测点。图3为边坡模型侧视图,监测点布置用于重点监测沿不同高程的坡表(A2、A6、A7、A8、A9、A10)和泥岩风化壳(A2、A3、A4、A5)以及坡体内部竖直方向(A1、A5、A10)的加速度变化情况。图4、5为边坡模型后视图和正视图,监测点布置用于重点监测在同一高程的斜坡坡肩($A9_H$、$A9_I$、$A9_F$)和泥岩风化壳地形凸出处($A4_H$、$A4_I$、$A4_F$)加速度变化情况,用于比较断裂带内部以及上下盘关键部位加速度响应的差异。

### 1.5 输入波的选取及加载方案

天然地震波能够较好地反映斜坡结构在实际地震作用下的动力响应特征[16,32]。本次试验输入2013年黄土地区岷县强震台所记录的岷县-漳县$M_S$6.6地震主震加速度时程,并对原型波的幅值沿

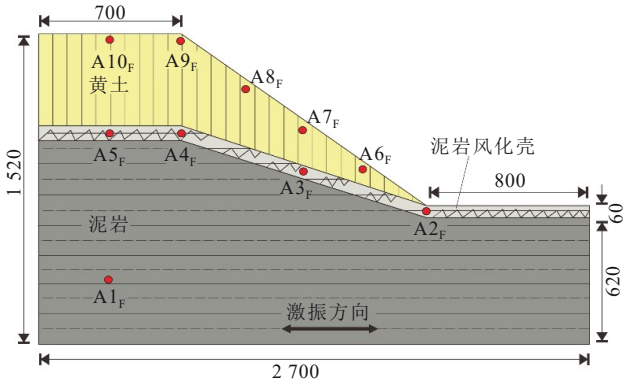



图 3　模型监测点侧视图（单位：mm）

Fig. 3　Side view of model monitoring points (unit: mm)

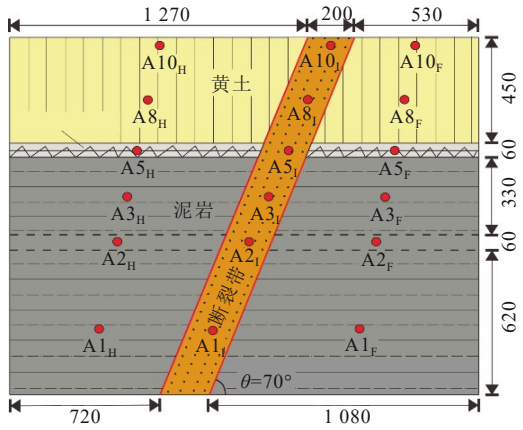



图 4　模型监测点后视图（单位：mm）

Fig. 4　Rear view of model monitoring points (unit: mm)

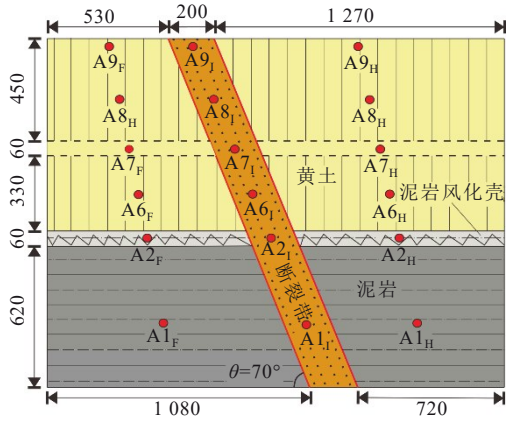



图 5　模型监测点正视图（单位：mm）

Fig. 5　Front view of model monitoring points (unit: mm)

整个时间轴进行标量缩放，以获得试验所需的不同幅值的地震动（图 6）。试验施加的水平 $X$ 向为激振方向，与断裂带纵切方向一致，并按照动荷载强度由弱到强的顺序，分级输入不同加速度幅值（0.1$g$、0.2$g$、0.4$g$、0.6$g$、0.8$g$）的岷县地震波，便于研究斜坡在不同地震动强度下的动力响应。在试验过程中，每次输入地震动之前输入白噪声对模型进行扫频，用于测试斜坡模型的动力特性。

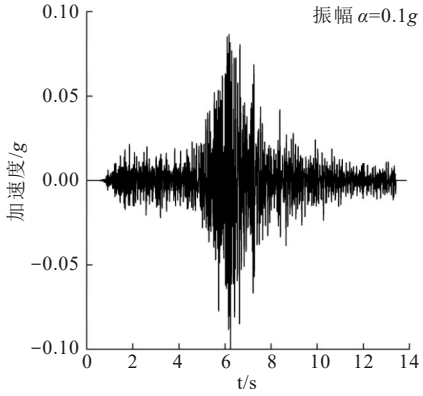



图 6　输入的岷县波加速度时程曲线

Fig. 6　Acceleration time-history curve of input Minxian wave

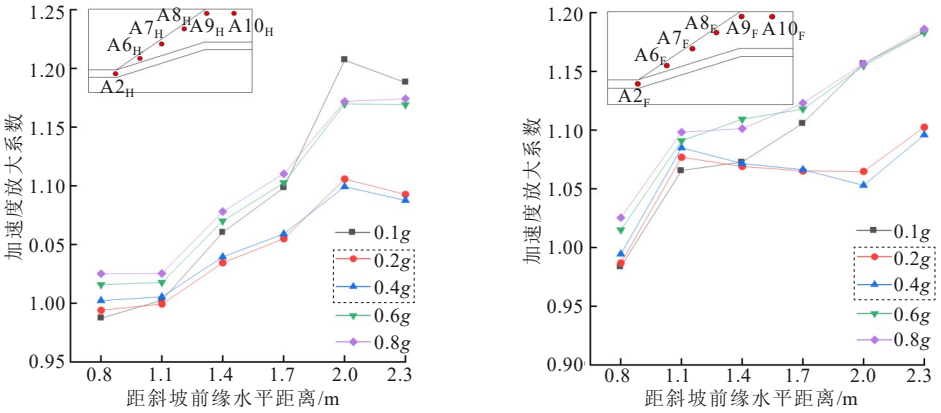
## 2　试验结果及分析

对于不同的斜坡形态、坡体结构特征，地震波的传播存在差异，会造成坡体内部不同部位的加速度响应特征不同。将加速度放大系数（Amplification Factor of Peak Ground Acceleration，$AF_{PGA}$）定义为各监测点获取的峰值加速度（Peak Ground Acceleration，PGA）与振动台面的监测点 A0 的 PGA 的比值。下面从坡表、泥岩风化壳、坡体内部竖直方向以及断裂带内部与外部 $AF_{PGA}$ 变化视角，分析揭示纵切型地表断裂黄土-泥岩斜坡的地震动力响应特征。

### 2.1　坡表加速度响应特征

图 7 为坡表各测点 $AF_{PGA}$ 的变化曲线，反映了在不同幅值作用下，断裂带上、下盘沿坡表的响应特征。在不同的输入幅值下，断裂带上盘各监测点 $AF_{PGA}$ 随高程增加表现为总体持续增大，在坡顶局部略有减小，其中在坡肩处（$A9_H$ 测点）$AF_{PGA}$ 最大，为 1.21，表现出明显的坡肩放大效应；断裂带下盘各监测点 $AF_{PGA}$ 随高程增加整体上呈非线性增大，在坡顶处（$A10_F$ 测点）$AF_{PGA}$ 最大，为 1.19。对比上盘和下盘坡表 $AF_{PGA}$ 曲线，放大系数总体呈现“趋高效应”，即随着高程的增加而增大。推测由于地震波传播至斜坡地形时产生的反射和折射，引发体波和面波两种波在坡肩和坡顶产生能量汇聚，导致其加速度响应呈现显著的放大特征，表明坡表的几何形态对加速度响应特征有明显的控制作用。

对于断裂带上、下盘沿坡表方向，坡脚处（A2 测




(a) 断裂上盘测点 (b) 断裂下盘测点

图 7 不同幅值作用下坡表监测点 $AF_{PGA}$ 变化曲线

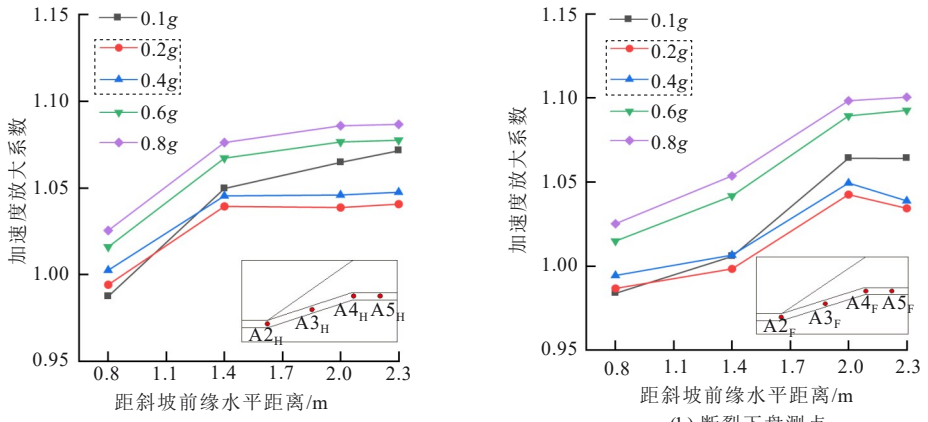
Fig. 7 Variation curves of $AF_{PGA}$ at slope surface monitoring points under different amplitudes

点)$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈正相关;随着地震波幅值的变化,在坡表下部(A6测点)向上均呈现出“两组分化”特征,即0.2$g$~0.4$g$中等幅值的$AF_{PGA}$低于0.1$g$低幅值和0.6$g$~0.8$g$高幅值的,前者极值可达1.10,后者极值可达1.21。该分化特征主要归因于上覆黄土在不同地震波幅值作用下,先后呈现“初始松散-振密状态-局部破坏”三种响应状态,动力响应特征在初始松散和局部破坏阶段趋近,与其弹性模量先升后降的动态变化相匹配,导致出现两组分化特征。同时,地震动幅值的增大引起岩土体结构和强度的动态变化,导致斜坡自振频率发生偏移,在激振频率不变的条件下,加速度放大系数在二者趋近时因共振作用表现出显著的放大效应,反之,则放大效应减弱。

## 2.2 泥岩风化壳加速度响应特征

图8为泥岩风化壳内各测点$AF_{PGA}$的变化曲线,反映了在不同幅值作用下,断裂带上、下盘沿泥岩风化壳方向的响应特征。在不同的输入幅值下,断裂带上盘各监测点$AF_{PGA}$随高程增加呈非线性增大,最大为1.09,其中在风化壳顶部(A5$_H$测点)和地形凸出部位(A4$_H$测点)$AF_{PGA}$值较为接近。在0.1$g$~0.4$g$幅值下,断裂带下盘各监测点$AF_{PGA}$随高程增加表现为总体持续增大,在风化壳顶部略有减小,其中在风化壳地形凸出部位(A4$_F$测点)$AF_{PGA}$最大,为1.06;在0.6$g$~0.8$g$幅值下,断裂带下盘各监测点$AF_{PGA}$随高程增加呈非线性增大,最大为1.10。对比上盘和下盘泥岩风化壳$AF_{PGA}$曲线,总体呈现放大系数的“趋高效应”。其中,泥岩风化壳下盘顶部$AF_{PGA}$变化趋势的差异,可能是下盘“承托式”结构受刚性约束与风化壳几何形态的综合影响而造成的,表现为低-中等幅值下顶部$AF_{PGA}$衰减、高幅值下持续增大的分段特征。

对于断裂带上下盘沿泥岩风化壳方向,随着地震波幅值的变化,在风化壳下部(A3测点)向上均呈




(a) 断裂上盘测点 (b) 断裂下盘测点

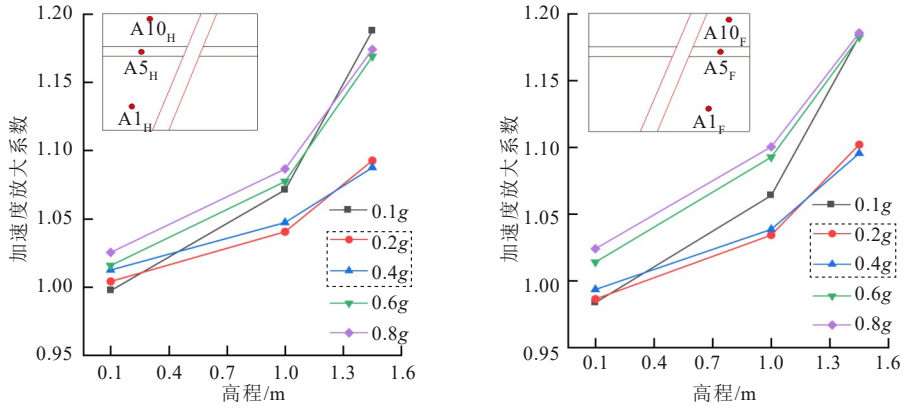
图 8 不同幅值作用下泥岩风化壳监测点 $AF_{PGA}$ 变化曲线

Fig. 8 Variation curves of $AF_{PGA}$ at monitoring points within the mudstone weathering crust under different amplitudes

现出“两组分化”特征，0.2$g$～0.4$g$中等幅值下$AF_{PGA}$的极值可达1.05，0.1$g$低幅值和0.6$g$～0.8$g$高幅值下$AF_{PGA}$的极值可达1.10。值得注意的是，0.1$g$低幅值条件下的$AF_{PGA}$在泥岩风化壳中上部出现明显增大现象，甚至在断裂上盘进入高值区。推测由于风化壳节理发育、弱胶结的岩土特性，以及材料刚度随着幅值的变化，呈现出与上覆黄土相似的“低-高-低”非线性变化，导致风化壳表现出类似分化特征。

### 2.3　坡体内部竖直方向加速度响应特征

图9为坡体内部竖直方向各测点$AF_{PGA}$的变化曲线，反映了在不同幅值作用下，断裂带上、下盘沿竖直方向的响应特征。在不同的输入幅值下，断裂带上、下盘坡体内部竖直方向$AF_{PGA}$变化规律基本相似，均表现为先缓慢增大后急剧增大的非线性增大特征，中部泥岩风化壳（A5测点）为曲线的“凹拐点”，坡顶$AF_{PGA}$最大，可达1.19。对比上、下盘坡体内部竖直方向$AF_{PGA}$曲线，“黄土-风化壳-泥岩”复合结构的斜坡受到地震作用时呈现出趋高效应与土层放大效应。该现象指示了地震波在风化壳-黄土中传播时波阻抗的差异性相比在泥岩-风化壳中更为显著，导致加速度响应在上部地层中放大效应更为强烈，也说明风化壳的存在对坡顶的动力响应有显著增强作用。




(a) 断裂上盘测点　　(b) 断裂下盘测点

图9　不同幅值作用下坡体内部竖直方向监测点$AF_{PGA}$变化曲线

Fig. 9　Variation curves of $AF_{PGA}$ at vertical monitoring points inside the slope body under different amplitudes

对于断裂带上、下盘沿竖直方向上，由于泥岩刚度大、泊松比稳定，下伏泥岩层中（A1测点）$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈正相关；随着地震波幅值的变化，在坡体中上部均呈现出“两组分化”特征，0.2$g$～0.4$g$中等幅值下$AF_{PGA}$的极值可达1.10，0.1$g$低幅值和0.6$g$～0.8$g$高幅值下$AF_{PGA}$的极值可达1.19。其中由于泥岩风化壳的存在，可使0.1$g$低幅值条件下$AF_{PGA}$突增至0.6$g$～0.8$g$对应的放大水平，且在0.1$g$低幅值时坡顶的放大作用最大，这类特征在上盘坡体表现更为明显。

### 2.4　断裂带对坡体动力响应的扰动分析

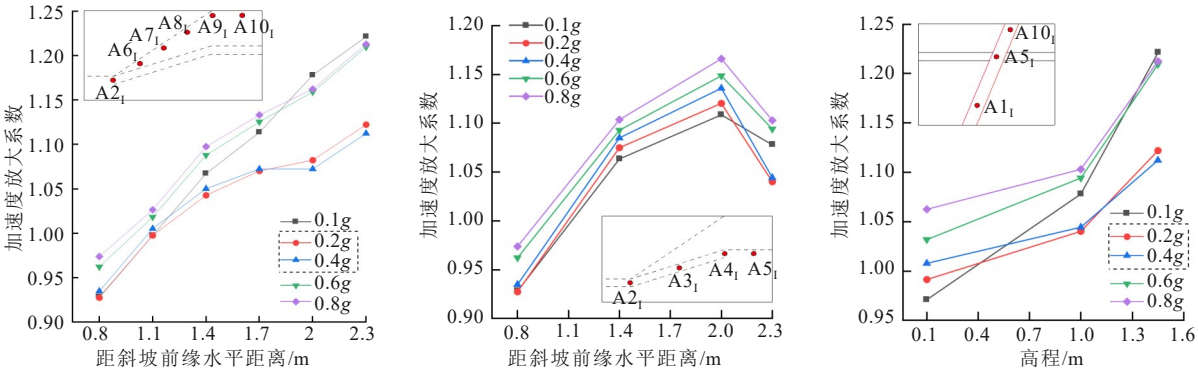
#### 2.4.1　断裂带内部

从图10(a)中可看出，在不同的输入幅值下，沿着坡表断裂带内部的$AF_{PGA}$均呈非线性增大，到达坡顶（$A10_I$测点）时地震动响应最大。随着地震波幅值的变化，坡表断裂带内部在坡脚处（$A2_I$测点）$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈正相关；在坡表下部（$A6_I$测点）向上呈现出“两组分化”特征，前者极值可达1.12，后者极值可达1.22。

从图10(b)中可看出，在不同的输入幅值下，沿着泥岩风化壳方向断裂带内部的$AF_{PGA}$均表现为先持续增大再减小，在地形凸出处（$A4_I$测点）$AF_{PGA}$最大，可达1.17。原因可能为该位置处于断裂带内部同时也处于风化壳地形凸出处，二者的叠加作用致使地震波到达此处后发生了较复杂的散射和聚焦效应，而导致产生更显著的加速度放大效应。泥岩风化壳方向断裂带内部测点$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值整体上呈正相关。

从图10(c)中可看出，在不同的输入幅值下，沿着竖直方向上断裂带内部的$AF_{PGA}$均表现为先缓慢增加后急剧增大的非线性增大特征，到达坡顶（$A10_I$测点）时地震动响应最大。随着地震波幅值的变化，竖直方向上断裂带内部在下伏泥岩层中（$A1_I$测点）$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈正相关；在

坡体中上部均呈现出“两组分化”特征，前者极值可达1.12，后者极值可达1.22。




(a) 坡表断裂带内部测点 (b) 泥岩风化壳方向断裂带内部测点 (c) 竖直方向上断裂带内部测点

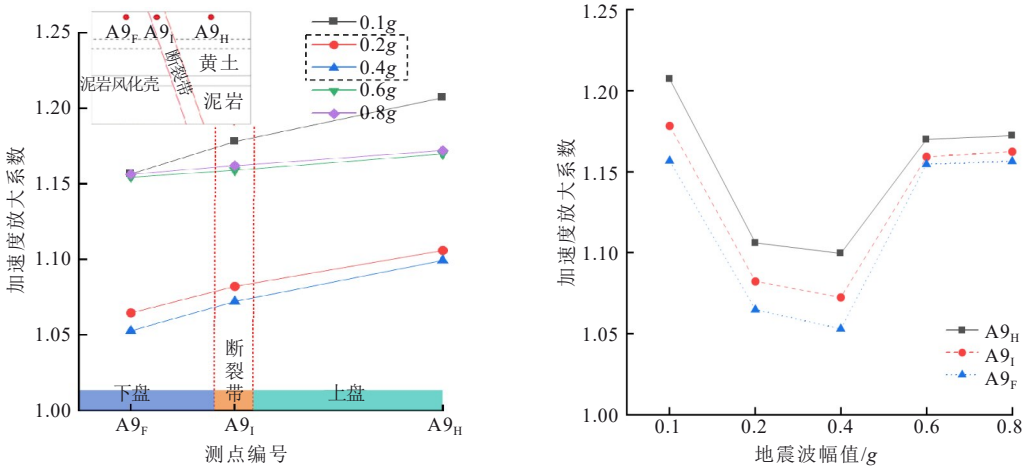
图10 不同幅值作用下断裂带内部监测点$AF_{PGA}$变化曲线

Fig. 10 Variation curves of $AF_{PGA}$ at monitoring points within the fault zone under different amplitudes

2.4.2 断裂带内部与外部比较

从图11(a)中可看出，在不同的输入幅值下，同一高程上的斜坡坡肩$AF_{PGA}$变化规律基本相似，均呈非线性增大的特征。断裂带上盘($A9_H$测点)$AF_{PGA}$最大为1.21，而下盘($A9_F$测点)的放大效应相对较小，其值介于1.05～1.16之间，呈现一定的上盘放大效应，推测与上、下盘坡体结构及参振介质特性相关；上盘坡体参振土体厚度和体积更大，在地震动作用下产生更为显著的土层放大效应。图11(b)中可看出，在斜坡坡肩处不同测点$AF_{PGA}$随地震波幅值的增大均表现出先减小再逐渐增大的特征。对比斜坡坡肩处$AF_{PGA}$曲线，随着地震波幅值的变化，在斜坡坡肩处呈现出“两组分化”特征，特别是0.1$g$低幅值时，在斜坡坡肩上盘处地震动响应最为强烈，放大倍数最高可达1.21。

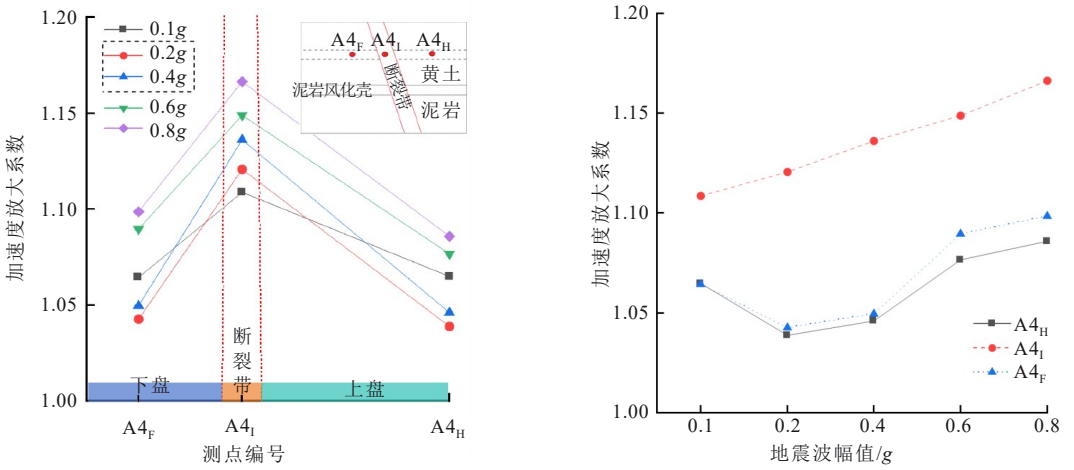
从图12(a)中可看出，在不同的输入幅值下，同一高程上的斜坡内部泥岩风化壳地形凸出部位$AF_{PGA}$变化规律基本相似，均呈先增大再减小的特征。断裂带内($A4_I$测点)$AF_{PGA}$最大可达1.17，而断裂带上、下盘($A4_H$、$A4_F$测点)的放大效应相对较小，其值介于1.04～1.10之间，表明断裂带内的放大效应更为显著。可能由于$A4_I$测点所处断裂带强度软弱，同时其几何结构位于风化壳和断裂交叉部位，复杂的界面条件引发地震波发生强烈的反射与折射，产生波场叠加，二者共同导致地震波能量在此处聚集并放大。图12(b)中可看出，在泥岩风化壳地形凸出部位不同测点$AF_{PGA}$随地震波幅值的增大总体均呈上升趋势，断裂带内($A4_I$测点)$AF_{PGA}$最大。对比斜坡内部泥岩风化壳地形凸出部位$AF_{PGA}$曲线，在断裂带内部$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈




(a) 同一高程上坡肩测点 (b) 加速度放大系数与地震波幅值的关系

图11 不同幅值作用下坡肩处监测点$AF_{PGA}$变化曲线

Fig. 11 Variation curves of $AF_{PGA}$ at monitoring points of slope shoulder under different amplitudes




(a) 同一高程上泥岩风化壳地形凸出部位测点　　(b) 加速度放大系数与地震波幅值的关系

图 12　不同幅值作用下泥岩风化壳地形凸出部位监测点 $AF_{PGA}$ 变化曲线

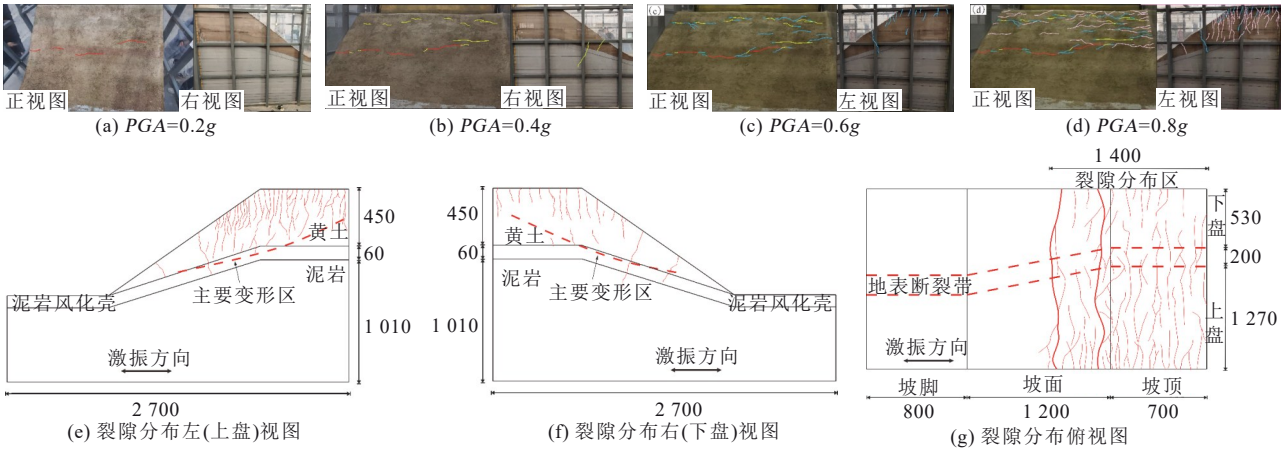
Fig. 12　Variation curves of $AF_{PGA}$ at monitoring points in the convex parts of the mudstone weathering crust under different amplitudes

正相关，且增大趋势最为明显。同时，位于同一高程的断裂带上盘（$A4_H$ 测点）与断裂带下盘（$A4_F$ 测点）的 $AF_{PGA}$ 值较为接近，未表现出上盘放大效应。

### 2.5　斜坡动力变形破坏特征

采用 4 种不同颜色的曲线表示峰值加速度 $PGA$=0.2$g$、0.4$g$、0.6$g$、0.8$g$ 四种工况下裂缝的发展情况［图 13(a)～(d)］。试验过程中，在施加峰值加速度 $PGA$=0.1$g$ 的地震动时，斜坡未发生明显变形；当 $PGA$=0.2$g$ 时，黄土层坡面中部最先出现横向微裂隙［图 13(a)］；当 $PGA$=0.4$g$ 时，坡顶和坡肩沿断裂带两侧出现横向微裂隙，坡面中部横向裂隙进一步向两侧延伸，斜坡右侧中部黄土-泥岩接触带附近出现竖向裂隙，深度可达 350 mm，并向上部黄土和下部泥岩中延伸［图 13(b)］；当 $PGA$=0.6$g$ 时，坡顶和坡肩处横向裂隙数量增多，斜坡左侧出现较多竖向微裂隙并向下延伸，坡面中部有一条长裂隙近乎横向贯通整个坡表，宽度 2～3 mm，从侧面可见深度达 380 mm［图 13(c)］；当 $PGA$=0.8$g$ 时，坡顶和坡肩处原有横向裂隙进一步沿断裂带向两侧延伸，坡肩处也出现一条近乎横向贯通的长裂隙，两条长裂隙最终宽度 3～4 mm，并在两条长裂隙附件产生许多小裂隙，斜坡左侧的竖向裂隙数量增加并向风化壳延伸，斜坡坡脚处轻微隆起，在坡面产生少量黄土块剥落［图 13(d)］。

经地震荷载作用后，裂隙主要分布于上覆黄土层中，断裂带上盘裂隙的规模和数量都明显高于下盘［图 13(e)～(g)］，表明斜坡的变形破坏表现出类似动力响应的断裂带“上盘放大效应”。地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡的变形破坏过程为：首先沿断裂带向两侧形成拉张裂隙并逐渐扩张，继而坡脚处




(a) $PGA$=0.2$g$　(b) $PGA$=0.4$g$　(c) $PGA$=0.6$g$　(d) $PGA$=0.8$g$

(e) 裂隙分布左(上盘)视图　(f) 裂隙分布右(下盘)视图　(g) 裂隙分布俯视图

图 13　斜坡变形破坏特征（单位：mm）

Fig. 13　Deformation and failure characteristics of the slope (unit: mm)

轻微隆起,最后形成从坡顶后方并延伸至坡面中部的潜在滑动面。

## 3 结论

通过开展断裂带斜坡的振动台物理模型试验,探究了地震作用下地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡的动力响应特征及变形破坏模式,得到主要结论如下:

(1) 在天然地震波作用下,该斜坡的坡表、风化壳以及坡体内部竖直方向的$AF_{PGA}$随高程增加总体上均呈非线性增大趋势,呈现出“趋高效应”。

(2) 在坡表、风化壳及坡体内部竖直方向的加速度放大效应整体上呈现出“两组分化”特征,表明其与斜坡非线性损伤的特征有关。沿着坡表向上$AF_{PGA}$呈现“两组分化”特征;坡脚处$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈正相关性。沿着风化壳向上$AF_{PGA}$同样呈现分化特征,其中0.1$g$低幅值条件下的$AF_{PGA}$在风化壳中上部明显增大;在断裂带内部,沿风化壳方向$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值整体上呈正相关性。沿着坡体内部竖直方向向上$AF_{PGA}$呈现分化特征,其中0.1$g$低幅值时坡顶的放大作用最大;下伏泥岩中$AF_{PGA}$的大小与地震波幅值呈正相关性。

(3) 在同一高程上,断裂带内、外部$AF_{PGA}$的差异性变化对斜坡放大效应有显著影响。位于斜坡坡肩处,断裂带上盘$AF_{PGA}$大于下盘,呈现一定的断裂带上盘放大效应;随地震波幅值增大$AF_{PGA}$呈先减小再增大的特征,特别是0.1$g$低幅值时,在断裂带上盘地震动响应最为强烈。位于风化壳地形凸出部位,断裂带内的$AF_{PGA}$高于断裂带上、下盘,表明断裂带内的放大效应更为显著;随地震波幅值增大$AF_{PGA}$总体均呈上升趋势,且在断裂带内部$AF_{PGA}$增大趋势最为明显。

(4) 地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡的变形破坏过程为:首先沿断裂带向两侧形成拉张裂隙并逐渐扩张,继而坡脚处轻微隆起,最后形成从坡顶后方并延伸至坡面中部的潜在滑动面。断裂带上盘最终产生裂隙的规模和数量均明显高于下盘,表明斜坡动力变形破坏也表现出断裂带的“上盘放大效应”。

(5) 本文研究的是地表断裂纵切型黄土-泥岩斜坡,在地震作用下断裂带和泥岩风化壳两种结构同时对斜坡的动力响应产生影响,致使斜坡的地震响应更为复杂,也从侧面说明断裂切割滑坡形式、斜坡结构、介质特性对斜坡的动力响应具有显著影响。目前对机理形成了初步认识,后续将开展基于数值模拟的模型重建和对比分析,对断裂带的产状、厚度、力学性质和结构特征等因素进行深入研究。

## 参考文献(References)


[1] 王兰民, 柴少峰, 薄景山, 等. 黄土地震滑坡的触发类型、特征与成灾机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1543-1554.
Wang Lanmin, Chai Shaofeng, Bo Jingshan, et al. Triggering types, characteristics and disaster mechanism of seismic loess landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1543-1554.

[2] Xu Y R, Allen M B, Zhang W H, et al. Landslide characteristics in the Loess Plateau, northern China[J]. Geomorphology, 2020, 359: 107150.

[3] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Investigation of dormant landslides in earthquake conditions using a physical model[J]. Landslides, 2017, 14(3): 1181-1193.

[4] Peng J B, Leng Y Q, Zhu X H, et al. Development of a loess-mudstone landslide in a fault fracture zone[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 658.

[5] 王新刚, 刘凯, 连宝琴, 等. 黄土-泥岩滑坡诱发因素及形成机理研究进展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 404-413.
Wang Xingang, Liu Kai, Lian Baoqin, et al. Recent advance in understanding inducing factors and formation mechanism of loess-mudstone landslides[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 404-413.

[6] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Seismic performance of loess-mudstone slope by centrifuge tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(2): 671-679.

[7] 袁道阳, 雷中生, 王爱国. 1654年甘肃天水南8级地震补充考证[J]. 地震工程学报, 2017, 39(3): 509-520.
Yuan Daoyang, Lei Zhongsheng, Wang Aiguo. Additional textual criticism of southern Tianshui $M$8 earthquake in Gansu Province in 1654[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 509-520.

[8] Xu Y R, Jing L Z, Allen M B, et al. Landslides of the 1920 Haiyuan earthquake, northern China[J]. Landslides, 2021, 18(3): 935-953.

[9] 邹谨敞, 邵顺妹. 古浪地震滑坡及其与断裂带的关系[J]. 西北地震学报, 1994(3): 60-65.
Zou Jinchang, Shao Shunmei. The relation between the Gulang seismic landslides and fault belts[J]. Northwestern Seismological Journal, 1994(3): 60-65.

[10] Yuan R M, Xu X W, Chen G H, et al. Ejection landslide at northern terminus of Beichuan rupture triggered by the 2008 $M_W$7.9 Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(5B): 2689-2699.

[11] Cui S H, Pei X J, Huang R Q. Effects of geological and tectonic characteristics on the earthquake-triggered Daguangbao landslide, China[J]. Landslides, 2018, 15(4): 649-667.

[12] 王会娟, 王平, 李旭东, 等. 地震诱发低角度黄土-泥岩滑坡动力响应及变形分析[J]. 地震工程学报, 2021, 43(6): 1409-1418.
Wang Huijuan, Wang Ping, Li Xudong, et al. Dynamic response and deformation analysis of low-angle loess-mudstone landslides induced by earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1409-1418.

[13] 马紫娟, 张有龙, 刘小丰, 等. 地震作用下陈庄黄土-泥岩接触面滑坡失稳机理及稳定性研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(4): 810-818.
Ma Zijuan, Zhang Youlong, Liu Xiaofeng, et al. Instability mechanism and stability analysis of Chenzhuang loess-mudstone interface landslide under seismic action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(4): 810-818.

[14] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.
Zhang Zelin, Wu Shuren, Wang Tao, et al. Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.

[15] 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 Zelin, Wu Shuren, 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.

[16] Zhang Z L, Wang T, Wu S R, et al. Seismic performance of loess-mudstone slope in Tianshui-Centrifuge model tests and numerical analysis[J]. Engineering Geology, 2017, 222: 225-235.

[17] Chen J C, Che A L, Wang L M, et al. Investigating the failure mechanism of loess-mudstone landslides with a high water content interface subjected to earthquakes through the shaking table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 177: 108406.

[18] Chen J C, Wang L M, Wang P, et al. Failure mechanism investigation on loess-mudstone landslides based on the Hilbert-Huang transform method using a large-scale shaking table test[J]. Engineering Geology, 2022, 302: 106630.

[19] Feng H Z, Jiang G L, He Z L, et al. Dynamic response and failure characteristics of a slope with bedrock subjected to earthquakes and rainfall in shaking table tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(7): 265.

[20] 贾向宁, 黄强兵, 王涛, 等. 陡倾顺层断裂带黄土-泥岩边坡动力响应振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2721-2732.
Jia Xiangning, Huang Qiangbing, Wang Tao, et al. Shaking table test of dynamic responses of loess-mudstone slopes with a steep dip bedding fault zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2721-2732.

[21] 余腾飞. 反倾断裂带黄土-泥岩边坡地震动力响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2018: 11-44.
Yu Tengfei. Study on seismic dynamic response of loess-mudstone slope with antidip fault zone[D]. Xi′an: Changan University, 2018: 11-44.

[22] Zhou C H, Liu W L, Wang P, et al. Centrifuge model test study on the deformation evolution of a soft-hard interbedded anti-dip high slope with a fault[J]. Indian Geotechnical Journal, 2026, 56(1): 280-292.

[23] Huang Q B, Jia X N, Peng J B, et al. Seismic response of loess-mudstone slope with bedding fault zone[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 371-380.

[24] Wei T, Fan X M, Xia M Y, et al. Hanging wall effects on cross-fault slope failures: shaking table experiment insights[J]. Engineering Geology, 2025, 350: 107985.

[25] 李丞, 苏立君, 张崇磊, 等. 粉土密实度对斜坡动力响应特性影响的振动台试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4124-4136.
Li Cheng, Su Lijun, Zhang Chonglei, et al. Shaking table tests on influences of dense degree of silt on dynamic response characteristics of slopes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4124-4136.

[26] 辛鹏, 吴树仁, 张泽林, 等. 西秦岭北缘断裂宝鸡—武山段活动触发滑坡分布规律与成因机制[J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 723-733.
Xin Peng, Wu Shuren, Zhang Zelin, et al. Distribution characteristics and formation mechanism of landslides triggered by activities of Baoji—Wushan segment at the northern margin of western Qinling fault zone[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 723-733.

[27] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(增刊2): 4019-4024.
Zhang Yanjie, Wang Xu, Liang Qingguo, et al. Development of model test similar material of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(S2): 4019-4024.

[28] 陶志刚, 赵易, 丰于翔, 等. 双向地震作用下跨断层破碎带隧道地震响应动力学试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(2): 637-650.
Tao Zhigang, Zhao Yi, Feng Yuxiang, et al. Dynamic experimental study on seismic response of cross fault fractured zone tunnels under bidirectional seismic action[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(2): 637-650.

[29] 苏晓亮. 顺倾断裂带黄土-泥岩边坡地震动力响应机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2018: 15-18.
Su Xiaoliang. Study on the dynamic response mechanism of

loess-mudstone slope with dip fault zone under earthquake [D]. Xi'an: Changan University, 2018: 15-18.

[30] Yu T F, Huang Q B, Kang X S, et al. On seismic response of loess-mudstone slope with underlying anti-dip fault zone: laboratory investigation using shaking table test[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 117.

[31] 黄雨, 张云秋, 邱振东, 等. 强震作用下青藏高原地区断裂控制型边坡动力响应规律与变形破坏机制研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2025, 55(5): 927-942.
Huang Yu, Zhang Yunqiu, Qiu Zhendong, et al. Dynamic response and deformation failure mechanism of fault-controlled slope in Qinghai-Xizang Plateau under strong earthquake action[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2025, 55(5): 927-942.

[32] 闫茜, 毛忠良, 王连俊, 等. 活断层震动断裂作用下高铁路基振动台试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 913-924.
Yan Qian, Mao Zhongliang, Wang Lianjun, et al. Study on shaking table model test of high-speed railway subgrade with active fault vibration and fracture[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 913-924.

(本文编辑:贾源源)

(上接第 1467 页)

Zhao Peipei. Statistics of characteristic parameters and research on fitting method of design response spectrum[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017:30-33.

[20] 李孝波, 欧阳刚垒, 宋霖君, 等. 黄土高原地区场地设计反应谱特征周期研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1161-1170.
Li Xiaobo, Ouyang Ganglei, Song Linjun, et al. Characteristic periods of the design response spectra of sites in the Loess Plateau region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(5): 1161-1170.

[21] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces: Tech0 Rep. TR-95-012, ICSI, USA[R]. 1995.

[22] 谭景阳, 胡进军. 基于改进差分进化算法的设计反应谱高稳定性标定方法研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(5): 16-25, 66.
Tan Jingyang, Hu Jinjun. Study on high stability calibration method of design response spectrum based on improved differential evolution algorithm[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(5): 16-25, 66.

[23] Shi Y, He H J, Huang W Q, et al. Investigating properties of vertical design spectra in Japan by applying differential evolution to KiK-net data[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 136: 106245.

[24] Pu W C, Wu M, Huang B, et al. Quantification of response spectra of pulse-like near-fault ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 104: 117-130.

[25] Shahi S K, Baker J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2456-2466.

[26] Ji K, Ren Y F, Wen R Z, et al. Near-field velocity pulse-like ground motions on February 6, 2018 $M_W$6.4 Hualien (Taiwan, China) earthquake and structural damage implications [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105784.

[27] Neri F, Tirronen V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis[J]. Artificial Intelligence Review, 2010, 33(1): 61-106.

(本文编辑:张向红)