

贾文君. 地震动强度增大过程中边坡土体的损伤演化及其计算方法研究[J]. 华南地震, 2022, 42(3): 116–122. [JIA Wenjun. Study on Damage Evolution and Calculation Method of Slope Soil During the Increase of Ground Motion Intensity[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 116–122]

# 地震动强度增大过程中边坡土体的 损伤演化及其计算方法研究

贾文君

(甘肃交通职业技术学院, 兰州 730207)

**摘要:** 地震作用下边坡失稳破坏过程也是土体损伤变形演化过程, 当前边坡模型试验中土体损伤的定量计算方法尚未提出; 研究以兰州新区职教园区内一填方边坡为原型, 开展了地震动强度逐级增大条件下边坡失稳破坏的模型试验, 研究边坡变形失稳过程中相关物理量随地震动强度的变化规律, 进而提出土体损伤的计算公式。研究发现: 在地震动强度增大过程中, 坡肩土体损伤变形最为显著, 传递函数频谱随地震动强度增大呈现有规律的减小变化, 土体阻尼比随地震动强度增大呈现指数函数增大变化, 据此提出了基于归一化阻尼比的土体损伤量计算公式, 该公式计算的土体损伤量也呈现指数函数增大变化, 反映了地震动作用下土体的非线性损伤变形破坏过程。文中提出的土体损伤量计算方法可为基于模型试验的边坡稳定性评价提供理论依据。

**关键词:** 黄土边坡; 模型试验; 地震动; 土体损伤

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)03-0116-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.03.14

## Study on Damage Evolution and Calculation Method of Slope Soil During the Increase of Ground Motion Intensity

JIA Wenjun

(Gansu Vocational and Technical College of Communications, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The process of slope instability and failure under earthquake is also the evolution process of slope soil damage and deformation. At present, the quantitative calculation method of soil damage in slope model test has not been proposed. Taking a filling slope on the west side of a college campus in Higher Vocational Education Zone of Lanzhou New Area as the prototype, the model tests of slope instability under the gradually increasing the ground motion intensity is carried out. In the process of slope deformation and instability, the variation law of transfer function spectrum with ground motion intensity is analyzed and studied, and then the calculation method of soil damage is put forward. The results show that the damage and deformation of the soil at the slope shoulder is the most signifi-

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 甘肃省教育厅2019年度高等学校创新能力提升项目(2019A-229)

作者简介: 贾文君(1980-), 男, 工学硕士, 副教授, 主要从事城市轨道交通、黄土及地基基础等方面的研究和教学工作。

E-mail: 594391316@qq.com

cant in the process of increasing the ground motion intensity, the frequency spectrum of the transfer function decrease regularly with the increase of the ground motion intensity, and the damping ratio of the soil in this area changes exponentially with the increase of ground motion intensity. Therefore, a formula for calculating the amount of soil damage based on the normalized damping ratio is proposed, and the amount of soil damage calculated by the formula also shows the law of exponential function increase, reflecting the nonlinear damage, deformation and failure process of soil mass under the ground motion. The calculation method of soil damage proposed in this paper could provide a theoretical basis for slope stability evaluation based on model test.

**Keywords:** Loess slope; Model test; Ground motion; Soil damage

## 0 引言

材料内部有许多孔隙和微裂缝,在一定的外部荷载作用下,微裂缝会不断扩展,使材料的强度和刚度等力学性能下降,这些导致材料和结构力学性能劣化的微观结构的变化称为损伤<sup>[1]</sup>。结构性土体的力学特性具有明显的损伤破损效应。连续介质损伤力学中以有效承载面积作为损伤变量定义的依据,有效承载面积减小的过程也就是材料的损伤演化过程。由于土体主要是在压应力状态下工作,土体在损伤后仍然可以承担压应力,在一定的应力条件下仍然具有抗剪强度,损伤部分并不是不能承担任何荷载<sup>[2]</sup>。因此,经典的损伤力学很难对结构性土体的损伤行为进行合理描述,为了得出符合岩土材料的损伤力学特性,Desai等<sup>[3-5]</sup>和沈珠江等<sup>[6-7]</sup>对经典损伤力学做了推广,各自提出了将土体视为复合体的思想。杨林德等<sup>[8]</sup>结合连续强度理论和统计理论,从接触面内部缺陷分布的随机性出发,首次建立了土与结构物接触面的统计损伤本构模型。周家伍等<sup>[9]</sup>认为结构性土体的损伤过程本质上是土体中结构相的变形能向相变损伤耗散能转化,相变损伤耗散能促使结构相退变为损伤相的损伤发展过程,从任意方向截面上看,结构相表面损伤后即变为损伤相的表面。

黄土是架空孔隙微结构极其发育的一类特殊土,具有很强的结构性,固相颗粒相互搭接形成的架空孔隙结构属于亚稳态结构体系,加之颗粒搭接之处多以接触连接为主,因此结构强度较低,在地震波这类往复动载作用下极易产生损伤变形。天然黄土边坡遭受地震作用时,剪切波便以应力波的形式在坡体内部自下而上层层传递,引起不同部位固相介质之间的拉压、剪切作用。对于支架孔隙发育的弱胶结黄土,在较低的动应力作用下便引起土体微结构损伤及损伤变形,从而引起边坡振动模态、动力响应特性改变;并且随着地

震动强度增大,土体损伤加剧,斜坡累计变形逐渐增大,最后导致边坡失稳破坏。为此,本文基于黄土边坡模型试验中土体阻尼比随地震动强度增加而逐渐增大的现象,提出了一种土体损伤量的定量计算方法,为基于模型试验的边坡稳定性评价提供理论依据。

## 1 边坡模型试验

兰州新区是第五个国家级新区,存在着大量的填方区和填方黄土边坡,这些填方边坡的地震稳定性是一个值得关注的问题。本项研究就以兰州新区职教园区一高校西侧高度10 m、坡度约20°的黄土边坡为原型,开展了地震动强度逐级增大条件下边坡失稳破坏的模型试验,进而提出土体损伤量的计算方法。在该边坡上、中、下不同部位取备黄土试样开展了土工试验,测试原型土体的物理力学参数,具体数据如表1所示。由于本次模型试验为黄土边坡失稳破坏模拟试验,故主要考虑重力及抗力相似条件<sup>[10-12]</sup>,根据原型尺寸和振动台模型箱大小确定几何比例尺为10:1,然后确定其它物理量的相似关系与相似比;模型试验用土在该边坡附近取备,依据推定的相似关系和相似比并通过大量的室内配比试验确定模型土的物理力学参数,相关数据如表2所示。

### 1.1 模型制作

模型制作过程严格按照固定工序开展,将所取土样碾碎、风干,而后测其含水率,作为模型用土;将风干土样按照含水率7%加水搅拌均匀,制备土样;按照压实后10 cm高度的土量称重并均匀摊铺于模型箱,后通过上覆钢板加重物压实,分层铺设直至到模型设计高度。在模型制作过程中,A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub>、B<sub>2</sub>~B<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>~C<sub>6</sub>、D<sub>4</sub>~D<sub>6</sub>、E<sub>6</sub>处布加速度传感器,共16个。

表1 边坡土体物理力学参数统计表  
Table 1 Statistics of physical and mechanical parameters of slope soil

统计 指标	含水率 /(%)	天然密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	压缩系数 /MPa <sup>-1</sup>	压缩模量 /MPa	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /kPa
样品个数	18	18	18	18	11	11	15	15
最大值	10.20	1.91	1.77	1.548	0.35	21.05	38.1	26.8
最小值	4.50	1.16	1.07	0.532	0.10	6.10	24.8	8.6
平均值	7.07	1.47	1.37	0.988	0.16	14.22	29.5	19.8
标准差	1.08	0.11	0.11	0.15	0.06	4.10	3.5	6.61
变异系数	0.15	0.08	0.08	0.15	0.37	0.29	0.12	0.33

表2 模型试验相似关系与土体物理力学参数  
Table 2 Similarity relation of model test and physical and mechanical parameters of soil

物理量	相似关系	相似比	原型	模型	备注
几何尺寸/m	$F_L=10$	10	—	—	控制量
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	$F_\rho=1$	1	1.47	1.47	控制量
粘聚力/(kPa)	$F_c=F_LF_\rho$	10	19.8	2	—
内摩擦角/(°)	$F_\varphi=1$	1	29.5	29.5	—
模量/MPa	$F_E=F_LF_\rho$	10	19.8	2.1	—
含水率/(%)	$F_w=1$	1	7.07	7	—
时间/s	$F_t=F_L^{1/2}$	3.16	—	—	—
加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	$F_a=1$	1	—	—	控制量

1.2 模型中传感器设置

根据测试分析计算需要，共安装了17个加速度传感器，见图1所示。在振动台台面处选取一点布设加速度传感器A<sub>0</sub>；坡脚前缘布设加速度传感器A<sub>1</sub>，距离台面250 mm，坡肩处布设加速度传感器A<sub>6</sub>，距离坡顶表面约50 mm，其它传感器的位置如图1所示。

1.3 试验加载工况

边坡模型试验中，设置多种加载工况，用逐级增大地震动强度的方法来观测研究边坡的失稳破坏现象；作用于岩土体的地震动强度增大会导致土体残余变形增大，而黄土残余变形增大过程中土体的阻尼比也会随之增大。本次模型试验共设制了100 gal、200 gal、400 gal、600 gal和1000

gal五种加载工况，加载了2013年岷漳M<sub>s</sub>6.6级地震的近场波，地震波峰值按照上述5种工况来调制。

2 试验结果分析与探讨

2.1 宏观变形及破坏

400 gal以下工况，边坡模型没有明显残余变形。如图2所示，在400 gal工况，坡肩出现几条细小裂纹。600 gal工况，先存裂纹长度和宽度都有一定程度的扩展，长约50~70 cm，深度约10~20 cm，开口宽度约0.2~0.3 cm。1000 gal工况，坡肩前缘约15 cm处出现一条深50 cm的贯通型拉张裂缝，裂隙最宽约3 cm，坡顶前缘至坡面2/3以上区域还出现了数条与最大张裂隙基本平行的裂隙，该区域土体损伤破坏严重。

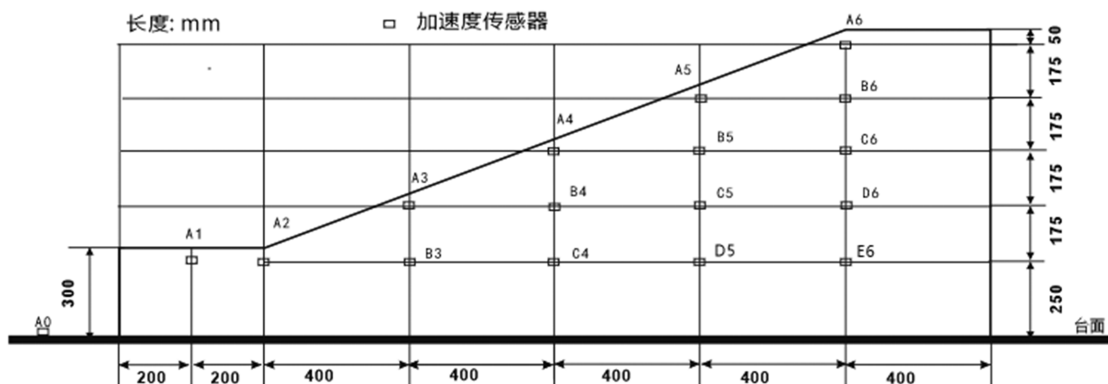


图1 边坡模型尺寸与传感器位置布设图

Fig.1 Slope model size and sensor location



(a)400 gal

(b)600 gal

(c)1000 gal

图2 边坡模型宏观变形失稳破坏

Fig.2 Macroscopic deformation and failure of slope model

## 2.2 振动加速度分析

边坡模型中不同部位的加速度时程序列减去同一加载工况下振动台台面加速度( $A_0$ )时程,得到某一加载工况下试验模型中不同部位的相对加速度时程:

$$AR_{ij} = AA_{ij} - AA_{i0} \quad (1)$$

式(1)中: $i$ 代表加载工况, $j$ 代表位置, $AR_{ij}$ 是第*i*个工况*j*点相对加速度, $AA_{ij}$ 为第*i*个工况*j*点绝对加速度, $AA_{i0}$ 为第*i*工况振动台台面绝对加速度。

由于本次模型试验中,坡肩区域变形破坏最为严重,故选用 $A_6$ 的加速度时程数据进行分析计算。用 $A_6$ 点不同加载工况的加速度时程减去同工况振动台台面 $A_0$ 点加速度时程,得到 $A_6$ 点不同加载工况的相对加速度时程,如图3。

通过边坡模型坡肩与台面的相对加速度传递函数可以获得其动力特性参数,传递函数<sup>[13]</sup>可表示为:

$$H_a(\omega, z_j) = \frac{G_{xy}(\omega, z_j)}{G_{xx}(\omega)} \quad (2)$$

式(2)中, $G_{xx}(\omega)$ 为 $AR_{ij}$ 的自功率谱; $G_{xy}(\omega, z_j)$ 为 $AR_{ij}$ 与振动台面输入加速度的互功率谱; $z_j$ 为*j*点位置。通过公式(2)求取了不同工况 $A_6$ 的相对加速度传递函数频谱曲线,见图4。传递函数频谱曲线中峰值对应的频率为边坡模型的自振频率,而频谱曲线中最大峰值对应的频率为一阶自振频率 $f_0$ ;100 gal、200 gal、400 gal、600 gal、1000 gal可求得5个加载工况 $A_6$ 点的 $f_0$ 分别为31.25 Hz、31.00 Hz、29.25 Hz、26 Hz、20.00 Hz。

计算一阶自振频率 $f_0$ 幅值0.707倍对应的两个频率值 $f_1$ 和 $f_2$ ,通过下式公式可求模型土体的阻尼比 $\lambda$ <sup>[13]</sup>:

$$\lambda = (f_2 - f_1) / 2f_0 \quad (3)$$

用公式(3)求得100 gal至1000 gal工况 $A_6$ 点的阻尼比分别为:0.21、0.23、0.26、0.41、0.65。



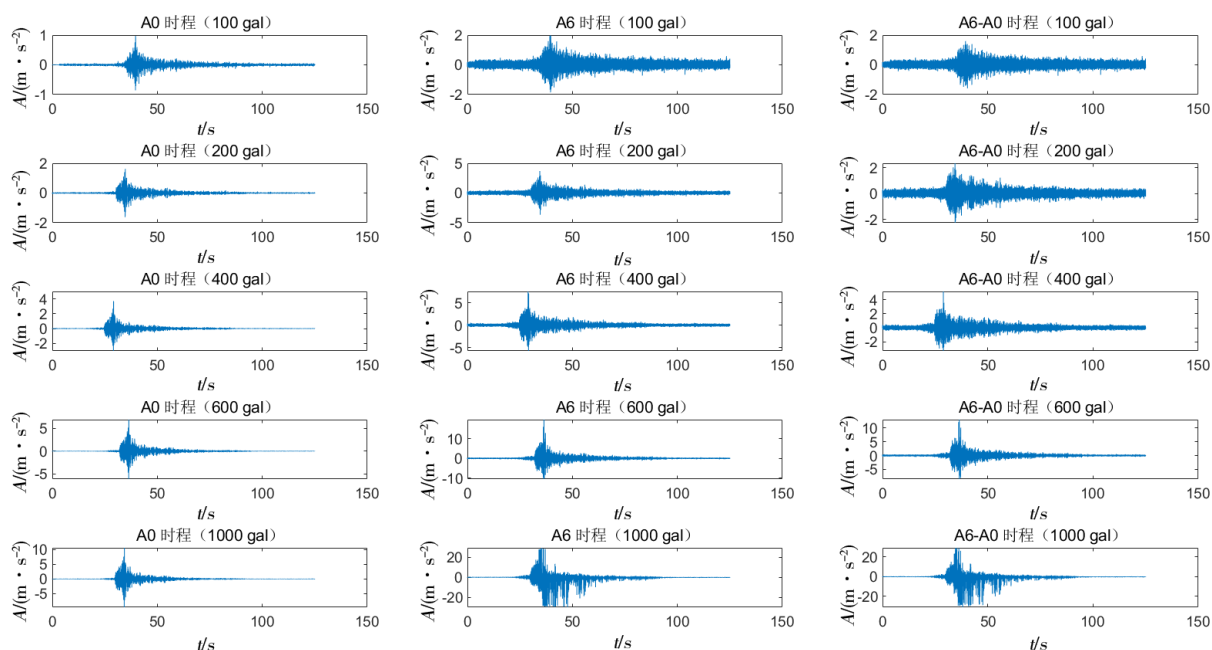
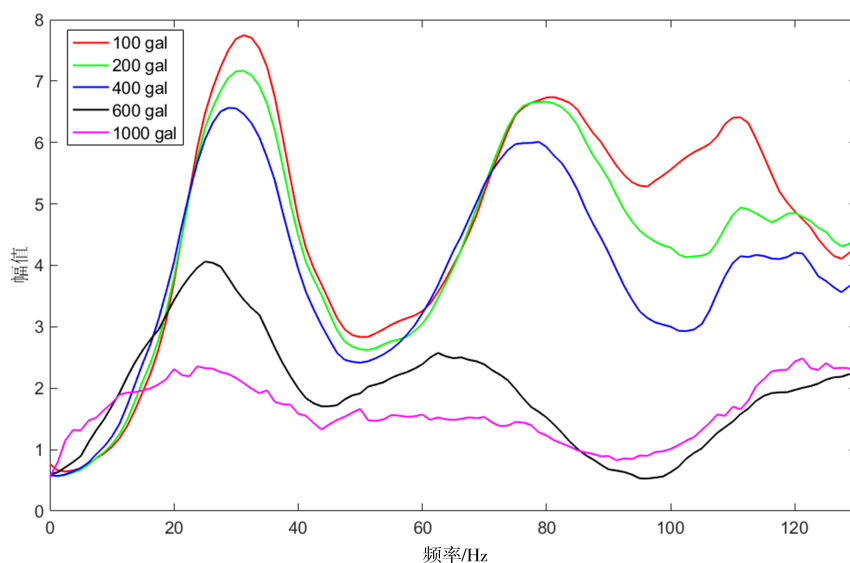


图3 不同部位的地震波时程

Fig.3 Seismic wave time history of different positions

图4 A<sub>6</sub>点相对加速度传递函数频谱曲线Fig.4 Spectrum curve of relative acceleration transfer function of A<sub>6</sub>

振动台模型试验中,随动载强度增大,导致残余变形逐渐增大,土体阻尼比会随着残余变形增大而增大,阻尼比的变化一定程度上反映了土体的损伤程度。第一个加载工况边坡土体没有明显的宏观残余变形,从图5也可以看到200 gal工况内坡肩土体的阻尼比变化较小,因此假定该工况边坡土体无损伤,故第一个工况为基准,计算后续工况斜坡模型土体的相对损伤,用归一化的阻

尼比来表征土体的损伤量,土体损伤量计算公式如下:

$$L_{di} = (\lambda_i - \lambda_1) / (\lambda_u - \lambda_1) \quad (4)$$

式(4)中, $i$ 代表加载工况, $\lambda_1$ 第一个加载工况的土体阻尼比, $\lambda_u$ 最后一个工况的土体阻尼比, $\lambda_i$ 是第 $i$ 工况的土体阻尼比, $L_{di}$ 定义为土体第 $i$ 工况的损伤量。

从图5、图6可以看到,坡肩土体的阻尼比随

地震动强度增大呈指数函数增大,由公式(4)计算土体损伤量也有相似的变化规律,反映了土体在地震动作用下的非线性损伤破坏过程。在不同强度地震动作用下,当土体无损伤时,由公式(4)计

算的土体损伤量为0,当失稳破坏时,土体损伤量为1,该公式可以定量计算不同强度地震动作用下土体的损伤量,进而判断土体的损伤程度。

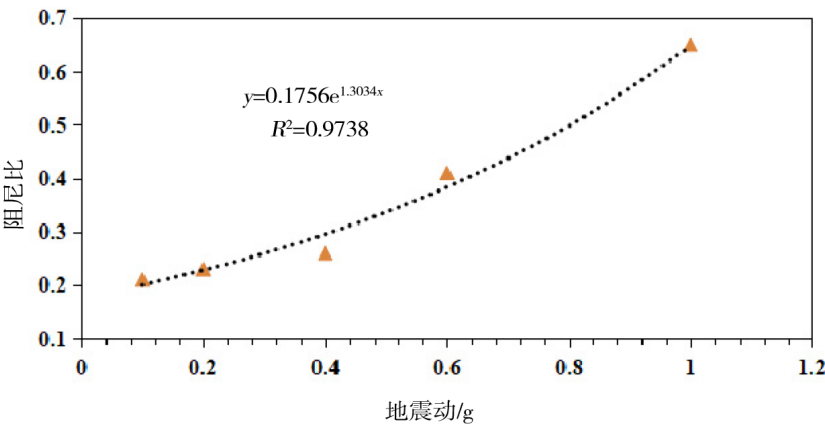


图5 阻尼比随加载地震动强度的变化  
Fig.5 Variation of damping ratio with loading

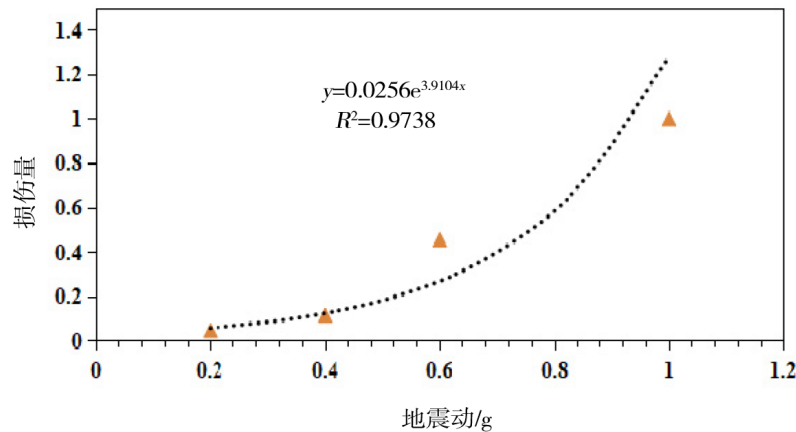


图6 土体损伤量随加载地震动强度的变化  
Fig. 6 Variation of soil damage with loading ground motion intensity

### 3 结论

(1)在振动台模型试验中,随着加载地震动强度增加,边坡土体逐渐出现宏观变形破坏现象,而传递函数频谱曲线形态也发生与其变形破坏程度相关联的改变,通过传递函数频谱曲线可以获取边坡动力特性参数。

(2)在地震动强度增大过程中,土体的残余变

形逐渐增大,通过传递函数可以求取的土体阻尼比也随地震动强度增大呈指数函数增大,阻尼比的变化一定程度上反映了土体的损伤变形程度。

(3)基于归一化阻尼比土体损伤量公式计算结果随地震动强度增大呈现指数型非线性增大现象,反映了地震动作用下土体的非线性损伤变形破坏过程,用该公式可定量计算并判断土体的损伤程度。

## 参考文献:

- [1] 赵锡宏,孙红,罗冠威. 损伤土力学[M]. 上海:同济大学出版社,2002.
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [3] Desai C S, Ma Y. Modeling of joints and interfaces using the disturbed-state concept[J]. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 1992, 16(9): 623-653.
- [4] Desai C S, Shao C, Park I J. Disturbed state modeling of cyclic behavior of soils and interfaces in dynamic soils-structure[C]//*Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. New York:ACM Press, 1997: 31-42.
- [5] Desai C S. *Mechanics of materials and interfaces: the disturbed state concept*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [6] 沈珠江,章为民. 损伤力学在土力学中的应用[M]//第三届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [7] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. *岩土工程学报*,1993,15(3):21-28.
- [8] 杨林德,刘齐建. 土-结构物接触面统计损伤本构模型[J]. *地下空间与工程学报*,2006,2(1):79-82.
- [9] 周家伍,刘元雪,李忠友. 基于能量方法的结构性土体损伤演化规律研究[J]. *岩土工程学报*,2013,35(9):1689-1695.
- [10] 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*,2000,40(01):1-8.
- [11] 李旭东,王平,王丽丽,等. 强震作用下坡顶建筑荷载对边坡稳定性影响研究[J]. *地震工程学报*,2021,43(5):1220-1227.
- [12] 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.
- [13] 蒋良潍,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(05):1368-1374.