

DOI: 10.11779/CJGE2019S2037

# 非饱和黄土动力特性及其对场地地震动参数的影响

魏 来<sup>1</sup>, 卢育霞<sup>\*1, 2, 3</sup>, 周正华<sup>4</sup>, 王 谦<sup>1, 2, 3</sup>, 杨 博<sup>1</sup>, 唐洪敏<sup>1</sup>, 李桐林<sup>1</sup>

(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;  
3. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 4. 南京工业大学, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 针对宁夏西吉地区不同含水率非饱和黄土进行动三轴试验, 在分析含水率对黄土动力特性影响的基础上, 采用土层地震反应分析方法研究地表黄土层含水率变化对黄土地带地面运动强度和特征的影响规律。研究表明, 随着含水率的升高, 土的动剪切模量逐渐减小, 阻尼比逐渐升高, 当含水率达到塑限时, 含水率变化对其影响明显减弱; 总体上, 随着输入地震动强度的增大和含水率升高, 黄土地带地表地震动 PGA 和反应谱值呈现增大的趋势; 而含水率对不同场地的地面运动强度和特征的影响差异性较大, 对于覆盖层较薄的场地, 在含水率达到 20% 时, 当输入加速度峰值大于 50 gal 时地震动放大倍数开始减小, 随着输入地震动的增大, 减小程度增大, 而反应谱长周期分量上谱值增大; 覆盖层较厚场地在输入加速度峰值 300 gal 时, 20% 含水率土层的放大倍数有所降低, 但反应谱值在 0.3 s 之后明显增大。

**关键词:** 非饱和黄土; 动剪切模量; 阻尼比; 土层地震反应; PGA; 加速度反应谱

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0145-04

作者简介: 魏 来(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: 1610352686@qq.com。

## Dynamic characteristics of unsaturated loess and their influences on ground vibration parameters of sites

WEI Lai<sup>1</sup>, LU Yu-xia<sup>1, 2, 3</sup>, ZHOU Zheng-hua<sup>4</sup>, WANG Qian<sup>1, 2, 3</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, TANG Hong-min<sup>1</sup>, LI Tong-lin<sup>1</sup>

(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, Lanzhou 730000, China; 3. Earthquake Administration of Gansu  
Province, Lanzhou 730000, China; 4. Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** The dynamic triaxial tests on the unsaturated loess in Xiji region of Ningxia under different water contents are carried out. Based on the analysis of the influences of water content on the dynamic characteristics of loess, the influences of water content of soil on the surface motion intensity and characteristics of a loess sites are studied by using the method of soil seismic response analysis. The results show that with the increase of water content, the dynamic shear modulus decreases and the damping ratio increases. When the water content reaches the plastic limit, the influences of change of water content are obviously reduced. On the whole, with the increase of input seismic motion and the increase of water content, the PGA and the values of reaction spectral in the loess site increase. And the influences of water content on the ground motion intensity and characteristics are different in different sites. For the thinner site, when the water content reaches 20%, and the input seismic motion is greater than 50 gal, the magnification begins to decrease, and with the increase of the input seismic motion, the decrease amplitude increases, while the value of the long period component of the reaction spectrum increases, and when the input seismic motion of thicker covering site reaches 300 gal, the magnification decreases when the water content reaches 20%, but the value of reaction spectra increased obviously after 0.3 s.

**Key words:** unsaturated loess; dynamic shear modulus; damping ratio; soil seismic response; PGA; acceleration response spectrum

## 0 引言

中国中西部地表广泛覆盖着不同时代、不同厚度的黄土, 震害调查与地面强地震动记录分析均表明黄土地带发生的各种地震地质灾害(滑坡、震陷和液化等)与场地强地面运动的放大效应密切相关。虽然地震波从震源传播至地表要经过几十或上百公里的岩

石, 但近地表常常不足百米的覆盖层却在场地强地面

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目  
(2015IESLZ05); 国家重点研发计划项目课题(2017YFC1500900)

收稿日期: 2019-04-28

\*通讯作者(E-mail: yuxial@163.com)

运动特征方面起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。一般采用场地地震反应分析方法来预测目标场地在输入基岩地震动作用下地表地面运动的强度和特征, 动剪切模量和阻尼比作为反映土动力特性的重要参数, 在场地的地震动力反应分析中是不可或缺的依据。作为一种具有大孔隙亚稳定微结构的特殊土类, 受到水或外荷载等因素的扰动, 黄土常常表现出独特的动力特性。正因为黄土的动力特性是影响黄土场地地震地面运动参数的重要因素之一, 所以应当重视水和外荷载扰动造成黄土动力特性的变化及其对黄土场地地震地面运动强度和特征的影响。

在地震荷载对原状黄土动力特性的影响方面, 已经开展了很多工作, 并获得了一些研究成果<sup>[2-4]</sup>, 这些基于室内土工试验的研究表明: 一般在黄土的骨架结构没有被破坏时, 随固结应力增大黄土的应力-应变曲线较陡, 动弹性模量随固结应力的增大而增大; 在应力条件相同时, 黄土的动弹性模量随其本身的孔隙比增大而减小, 也随黄土的湿度的增大而减小。然而这些研究并没有将黄土的动力特性变化与黄土场地地震地面运动参数变化直接联系起来。由于黄土具有强烈的水敏感性和地震易损性, 在受水和地震荷载两种因素综合作用时, 会引发更严重的地震地质灾害<sup>[5]</sup>。在地下水的变化对黄土场地地表加速度反应峰值和反应谱的影响方面, 宋炳辉等<sup>[6]</sup>采用土层地震反应分析方法研究认为地下水下渗一定程度上对地表加速度峰值具有减震作用。然而, 天然黄土大多数处于非饱和状态, 同时黄土地区大多属于干旱半干旱地区, 一般连续数天的降雨量也是有限的, 很多情况下地表有限的降雨量可能会在一段时间内改变土体表层含水率, 但并不一定能够达到饱和状态。本文选择宁夏西吉地区的原状土样进行动三轴试验, 在分析含水率和埋深对黄土动力特性变化趋势的基础上, 采用土层地震反应分析方法研究地表黄土层含水率变化对黄土场地地面运动强度和特征的影响规律。

## 1 试验方法

试验土样取自宁夏南部西吉县滥泥河流域, 该地区在 1920 年海原 8.5 级大震中位于 IX 度区, 取土深度 3~11 m, 为 Q<sub>3</sub> 黄土。将原状黄土土样按照实验要求削制为直径 5 cm, 高 10 cm 的标准土样。为了研究含水率对动剪切模量和阻尼比的影响, 将目标含水率设定为 5%, 12%, 20%。其配水后基本物性参数及固结条件如表 1。试验前先对土样液塑限及波速进行测试, 结果显示, 随着含水率的增大, 波速逐渐降低, 具体数值见表 1。

表 1 土样基本物性参数及固结条件

Table 1 Basic physical parameters and consolidation conditions of soil samples

编号	深度 /m	$\rho$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	塑限 /%	$V_s$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\sigma_1$ /kPa	$\sigma_3$ /kPa
A-5%		1.37		140		
A-12%	3.5	1.48	18	100	61	36
A-20%		1.56		90		
B-5%		1.32		170		
B-12%	9	1.43	20	120	132	78
B-20%		1.55		108		
C-5%		1.37		170		
C-12%	11	1.48	18	120	147.7	87
C-20%		1.57		108		

本次试验采用英国 Wykeham Farrance 生产的 WF-12440 型动三轴扭剪仪, 主要用于完成动、静三轴及空心圆柱动扭剪试验。循环加载前对试样进行固结, 固结条件由深度计算所得, 试验过程中不排水, 固结压力保持不变。待固结稳定后采用分级加载的方式向试样的轴向由小到大逐级施加 1 Hz 的正弦波, 每级动应力振次为 10 次。将试验过程中采集到的各级荷载的动应力应变进行整理用以确定各动应变时的动模量和阻尼比。

## 2 动力特性试验结果

土的动剪切模量是使土体产生单位动应变所需的动剪应力, 表现了土体抵抗剪切变形的能力, 也是评价土体抗震能力的指标。试验分析表明黄土动剪切模量比与其埋深呈正相关关系。根据本次试验结果计算的黄土动剪切模量比与动剪应变关系曲线显示(图 1), 在剪应变较小时, 动剪切模量比几乎没有变化, 当动剪应变达到  $5 \times 10^{-4}$  时, 动剪切模量比逐渐减小且衰减速率逐渐加快。随着含水率的升高, 动剪切模量比的衰减速率增快。这是因为在含水率较低时, 土体颗粒间的联结强度较大, 具有较强的结构性, 不容易破坏; 随着含水率的升高, 颗粒间的联结强度降低, 结构性也越来越弱, 抗变形能力降低。土样 B 的塑限为 20%, 为了研究塑限的影响, 增配 18% 与 22% 两种含水率的土样, 图 1 中可见在接近塑限含水率时动剪切模量比曲线变化非常微小。

阻尼比表征了土体受动力作用时耗能能力的大小。阻尼比越大, 土体吸收消耗动能的能力越强, 动力作用对土体造成的损害也随之越小。图 1 中不同含水率的 3 种黄土(A, B, C)土样的阻尼比随动剪应变的变化特点类似, 阻尼比在小变形的变化较小, 随着动剪应变的增大阻尼比逐渐增大, 在动剪应变达到 0.01 时, 阻尼比增长趋势渐缓。不同含水率土体的阻尼比随剪应变的增长速率存在较大差异, 高含水率土

体阻尼比增长速率明显增大, 这表明地震能量在高含水率土体中损失更快。

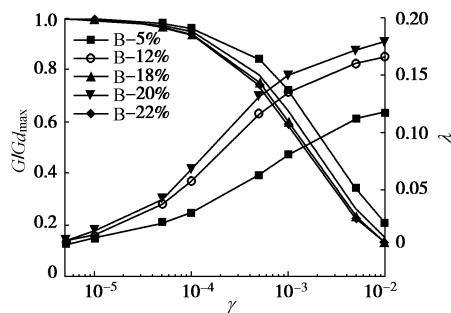


图 1 黄土动剪切模量比、阻尼比与动剪应变关系曲线

Fig. 1 Relationship among dynamic shear modulus ratio, damping ratio and dynamic shear strain of loess

### 3 土层地震反应分析

#### 3.1 输入地震动

本次计算选择 3 种地震记录作为基岩输入地震动(图 2), 其中 R1 为 2008 年汶川 M8.0 级地震临潭台的记录, R2 为 2014 年鲁甸 M6.5 级地震迤车台记录, R3 为 2013 年芦山 M7.0 级地震民治台记录, 这 3 种地震动的频谱分别在低频段、1 Hz 附近和高频段具有优势(图 2), 经过处理后其 PGA 分别为 10, 100, 300 gal。为了深入研究输入地震动强度对地表峰值加速度与加速度反应谱的影响, 通过调幅得到了另外 3 条加速度时程, 分别为由 R1 调幅为 50 gal 的 R1-50、由 R2 调幅为 200 gal 的 R2-200、由 R3 调幅为 150 gal 的 R3-150 地震动时程。

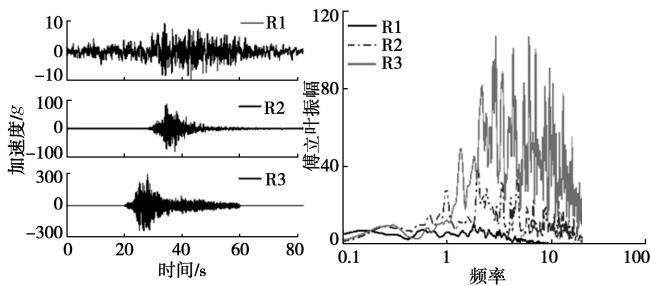


图 2 输入地震动时程及傅立叶频谱

Fig. 2 Input seismic motion and Fourier amplitude spectrum

#### 3.2 计算模型

根据黄土震害场地的实际钻孔等相关资料构建了 3 个地层模型(表 2), 模型 1(M1)场地覆盖层厚度大约 20 m, 模型 2(M2)场地覆盖层厚度大约 39 m, 模型 3(M3)场地覆盖层厚度大约 95 m。为了研究地表黄土层含水率变化对黄土场地地面运动强度和特征的影响规律, 考虑到黄土地区降雨量较少及雨水的渗透能力, 计算中仅改变上层 3.5 m 的含水率。

表 2 计算模型

Table 2 Analytical models

模型编号	序号	岩土性质	深度 /m	波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
M1	1	黄土	10	190	1.50
	2	卵石	14	370	2.01
	3	卵石	20	450	2.01
	4	板岩	22	638	2.12
M2	1	黄土	17	190	1.50
	2	黄土状粉质黏土	27	250	1.68
	3	黄土状粉质黏土	39	340	1.75
	4	泥岩	40	580	2.12
M3	1	黄土	13.6	209	1.50
	2	黄土状粉质黏土	28.7	285	1.68
	3	黄土状粉质黏土	52.5	364	1.78
	4	黄土状粉质黏土	69.2	446	1.82
	5	黄土状粉质黏土	83.9	532	1.85
	6	黄土状砂土	89.5	596	1.98
	7	泥岩	95.0	700	2.12

#### 3.3 计算结果

采用一维土层地震反应等效线性化分析方法进行土层地震反应计算, 表 3 为计算所得各模型的 PGA。计算结果表明, 对于 M1, 含水率由 5% 增至 12% 时, PGA 放大倍数增大, 增至 20% 时 PGA 放大倍数减小, 输入地震动越大, 减小越多, M2、M3 在输入地震动峰值 300 gal 时, 20% 含水率的土层会使 PGA 的放大倍数减小, 但仍高于 1, 其余情况 PGA 均呈增大趋势。

表 3 计算模型 PGA

Table 3 PGA of analytical models

模型编号	表层土含水率/%	不同输入波的地表 PGA/gal				
		R1	R1-50	R2	R3-150	R2-200
M1	5	21.3	104.0	273.1	307.9	507.1
	12	24.4	115.0	291.0	380.5	557.4
	20	24.5	114.7	288.5	360.0	486.1
M2	5	24.8	111.7	191.7	263.0	314.1
	12	26.9	119.4	207.5	290.2	367.4
	20	27.6	121.5	208.4	289.8	385.40
M3	5	21.6	91.7	167.10	213.5	286.5
	12	23.2	100.8	186.50	240.9	328.2
	20	24.2	105.3	198.10	260.0	360.2

地表加速度反应谱计算结果(图 3)显示, 输入地震动峰值小于 50 gal 时, 3 个模型计算得到的反应谱形状不受含水率的影响, 但谱值在周期 0.6 s 之前随含水率的升高小幅增大; 输入地震动峰值 100 gal 时, M1 发生变化, 在 0.1~0.2 s 附近, 20% 含水率土层的计算结果减小, 在 0.3 s 附近明显增大, M2, M3 的规律不变; 输入地震动峰值为 150 gal 或 200 gal 时, M1 反应谱在 0.1 s 时, 含水率 20% 土层的结果小于 5% 含水率土层的结果。

水率计算结果。而 M2、M3 在 20%含水率时土层反应谱峰值在 0.1 s 开始减小，但仍高于 5%含水率的计算结果，0.2 s 之后仍呈增大的趋势；输入地震动峰值达 300 gal 时，M2，M3 反应谱在 0.1 s 处 12%与 20%计算结果均减小，之后呈增大的趋势且峰值对应的周期向长周期移动。对比 PGA 计算结果，M1 计算得到的 PGA 变化规律与反应谱峰值变化规律相同，但 M2、M3 土层含水率为 20%，输入地震动峰值为 300 gal 时，PGA 减小，而反应谱峰值仍略有升高。因此，对于 3 个不同的计算模型来讲，在输入地震动峰值超过 100 gal 时，在短周期上高含水率的反应谱峰值明显减小，在 0.2 s 之后增大，场地的峰值周期明显增大。

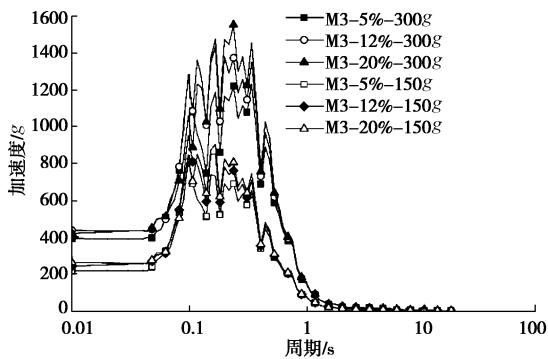


图 3 地表加速度反应谱

Fig. 3 Surface acceleration spectrum coordinates

## 4 结 论

基于黄土动力特性受含水率和埋深影响的研究结果，利用一维场地地震反应分析方法，计算研究了含水率的变化对地表加速度峰值及反应谱峰值、特征周期的变化规律，主要结论如下：

(1) 非饱和黄土的含水率变化导致黄土的波速、密度、土性参数一系列的变化，这些参数均对土层反应有重大的影响。随着含水率的升高，土的动剪切模量比逐渐减小，阻尼逐渐增大，但当含水率接近塑限时，含水率的升高对动剪切模量比几乎没有影响；波速随含水率的增大逐渐减小。

(2) 总体上，随着输入地震动强度的增大，含水率的升高，黄土场地 PGA 和反应谱峰值均呈现增大的趋势。当地震动强度较小时，PGA 与反应谱幅值的放大倍数主要受波速的影响，含水率的升高会导致波速降低从而使 PGA 与反应谱幅值的放大倍数增大。

(3) 不同计算模型的 PGA 与加速度反应谱受含水率的影响差异较大，对于覆盖层较薄的模型 M1，在含水率达到 20%时，随着输入地震动峰值的增大，PGA 放大倍数减小，但反应谱特征周期向长周期移动；覆盖层较厚的计算模型在输入地震动峰值加速度

300 gal 时，20%含水率的土层会使 PGA 放大倍数降低，但反应谱长周期峰值明显增大。

本文研究成果为更科学地认识黄土地震反应特征提供了依据，对黄土地区的抗震设防工作具有参考价值。

## 参 考 文 献:

- [1] 卢育霞, 石玉成, 万秀红, 等. 近地表速度结构对场地强地震动特征的影响[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 813 - 819. (LU Yu-xia, SHI Yu-cheng, WAN Xiu-hong, et al. Influence of near-surface Velocity Structure on Site characteristics of Strong Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 813 - 819. (in Chinese))
- [2] 李启鵠, 程显尧, 蔡东艳. 地震荷载下黄土的动力特性[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1985(3): 9 - 37. (LI Qi-yao, CHENG Xian-rao, CAI Dong-yan. Dynamic characteristics of loess under seismic load[J]. Journal of Xi'an institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1985(3): 9 - 37. (in Chinese))
- [3] 骆亚生, 田堪良. 非饱和黄土的动剪模量与阻尼比[J]. 水利学报, 2005(7): 830 - 834. (LUO Ya-sheng, TIAN Kan-liang. Dynamic shear modulus and damping ratio of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(7): 830 - 834. (in Chinese))
- [4] 王志杰, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1464 - 1469. (WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, WANF Rui-rui, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of undisturbed loess in different regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1464 - 1469. (in Chinese))
- [5] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土地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))
- [6] 宋丙辉. 兰州黄土的动力特性及其场地地震动反应[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. (SONG Bing-hui. Study on the dynamic properties of Lanzhou loess and associated site response analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese))