

DOI: 10.11779/CJGE2017S1038

# 甘南地区黄土的动模量与阻尼比特性研究

王 谦<sup>1</sup>, 李 娜<sup>1</sup>, 王 平<sup>\*1</sup>, 侯鹏博<sup>2</sup>, 钟秀梅<sup>1</sup>, 王 峻<sup>1</sup>, 王会娟<sup>1</sup>

(1. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 通过室内动三轴试验, 研究了甘南地区次生黄土的动本构关系, 得到了模型参数, 分析了甘南黄土的动剪模量比和阻尼比发展特征, 提出了动剪切模量衰减模型和阻尼增长模型; 并通过归一化处理 and 模型参数比较, 对次生黄土与风成黄土动剪模量比和阻尼比的差异性进行了讨论。结果表明: 次生黄土的动本构关系服从双曲线模型, 模型参数  $a$  值较风成黄土无明显差异, 但  $b$  值为相同条件下风成黄土  $b$  值的 1.5~3 倍, 且模型参数与天然含水率、干密度等物性参数和固结围压不存在明显的相关性。次生黄土的初始动弹性模量  $E_{dmax}$  受固结条件、密度影响较大, 相同条件下残坡积黄土的  $E_{dmax}$  较冲洪积黄土小。次生黄土的动剪模量比随动剪应变增大而减小, 变化趋势满足负指数衰减模型; 阻尼比随动剪应变的增大而增大, 变化趋势服从对数关系; 相比于风成黄土, 其动剪模量比随动剪应变的增加衰减更快, 阻尼比增长范围较窄, 表明沉积环境对黄土动力特性的差异性影响显著。

**关键词:** 次生黄土; 动本构关系; 动模量; 阻尼比

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S1 - 0192 - 06

**作者简介:** 王 谦(1985 - ), 男, 甘肃临夏人, 助理研究员, 主要从事黄土动力学研究工作。E-mail:wangq0930@126.com。

## Behaviors of dynamic modulus and damping ratio of loess in Gannan region of Gansu Province

WANG Qian<sup>1</sup>, LI Na<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, HOU Peng-bo<sup>2</sup>, ZHONG Xiu-mei<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, WANG Hui-juan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration & Gansu Province, Lanzhou 730000, China,

2. Energy China GSEPD, Lanzhou 730000, China )

**Abstract:** The dynamic constitutive relation of redeposited loess in Gannan region is investigated based on the dynamic triaxial tests. The model parameters are obtained, and the behaviors of dynamic shear modulus ratio and damping ratio are analyzed. The attenuation model for the dynamic shear modulus and the growth model for the damping ratio with dynamic shear strain are provided. Moreover, the differences about the shear modulus ratio and damping ratio between redeposited loess and eolian loess are discussed depending on the normalization processing and comparison of model parameters. The results show that the dynamic constitutive relation of redeposited loess obeys the hyperbolic model, and the value of model parameter  $a$  has no obvious difference with that of the eolian loess, but the value of  $b$  is 1.5 times that to 3 times that of the eolian loess under the same condition. The original dynamic elasticity modulus  $E_{dmax}$  of redeposited loess is greatly influenced by the consolidation condition and the loess density, and under the same condition, the value  $E_{dmax}$  of residual loess is smaller than that of alluvia loess. The dynamic shear modulus ratio of redeposited loess decreases with the increase of dynamic shear strain, and the variation trend of shear modulus ratio presents a tendency of negative exponential attenuation model. The trend of  $D \sim \gamma_d$  obeys the logarithmic relationship which increases with the increase of dynamic shear strain. Compared with that of the eolian loess, the attenuation rate of the dynamic shear modulus of the redeposited loess is more quickly, and the increase range of the damping ratio is relatively narrow, which indicates the obvious influences of sedimentary environment on the differences of dynamic properties of loess.

**Key words:** redeposited loess; dynamic constitutive relation; dynamic modulus; damping ratio

## 0 引 言

黄土具有大孔隙、弱胶结的特性和强烈的动力易损性, 其按成因类型可分为风积类型、残坡积类型和冲洪积类型等。其中风积类型黄土又称原生黄土, 坡

**基金项目:** 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH16038Y); 国家自然科学基金项目 (51408567, 51478444); 甘肃省科技计划项目 (1308RJZA153)

**收稿日期:** 2016 - 11 - 28

**\*通讯作者** (E-mail: lanzhouwang\_p@126.com)

积、冲洪积等类型的黄土又称次生黄土。不同成因类型黄土的物理力学特性由于主导地质作用的不同而存在显著的差异性。中国黄土分布区多位于高烈度地震区, 近百年来, 发生在中国黄土高原地区的7级以上地震数量约占全国总数的1/3, 诱发的岩土地震灾害造成了巨大损失。

岩土体的动弹性模量和阻尼比是描述其动力变形特性的两个基本参数, 也是实际工程设计和动力稳定性分析中所需考虑的最主要的动力参数<sup>[1]</sup>。近30多年来, 国内外对典型风积类型黄土的动弹性模量和阻尼比特性进行了较为深入的研究。李启鹏等<sup>[2]</sup>研究了模拟地震荷载作用下西安原状黄土的动剪切模量和阻尼比的主要影响因素, 得出剪应变幅值、初始孔隙比、围压、含水率和结构性对原状黄土的动剪切模量和阻尼比有重要影响。朱克廉等<sup>[3]</sup>基于动三轴试验, 分析了不同因素对黄土动本构关系、动模量和阻尼比的影响, 提出了可供工程应用参考的黄土动模量、阻尼比经验公式; 王峻等<sup>[4]</sup>研究了地震前后兰州黄土的动弹性模量和阻尼比的差异性。王建荣等<sup>[5]</sup>利用动三轴试验研究了原状黄土动本构关系在不同振动频率下的变化规律, 证明了不同频率下原状黄土的动本构关系均服从双曲线模型, 且试验常数、动弹性模量及阻尼比随振动频率呈现不同的变化规律。王志杰等<sup>[6]</sup>利用动扭剪三轴试验测定兰州、洛川、杨凌不同地区原状黄土的动剪切模量及阻尼比, 从空间平面上分析了黄土动力参数分布的区域性特征。然而, 现有的研究所涉及有关次生黄土的动弹性模量和阻尼比的成果相对较少, 对于黄土高原山前边缘地区与河谷地区的城镇工程建设中所面临的抗震安全问题, 尚难以提供可靠的动力稳定性分析参数。

合作市位于青藏高原东北部和黄土高原的过渡地带, 格河、扎刹河断陷谷地之上, 其北部和南部分别为阿姆尼念山和当周山山地。市区黄土成因类型以残坡积和冲洪积类型为主, 覆盖层厚度为11.0~22.8 m。区内分布有临潭—宕昌断裂和西秦岭北缘断裂, 抗震设防烈度Ⅶ度, 存在较高的地震危险性<sup>[7]</sup>。本项研究以合作地区黄土的动三轴试验为基础, 通过分析试验成果, 研究了循环荷载作用下次生黄土的动应力-动应变关系, 给出了相应的模型参数; 并分析了次生黄土的动模量和阻尼特性、主要影响因素及其与风成黄土动模量和阻尼比的差异性。研究成果可对黄土高原山前边缘地区与河谷地区建设工程地基动力稳定性分析提供参考依据。

1 试样、仪器和试验条件

试验所用的9组土样取自甘肃省合作市7个不同的场地, 为冲洪积或残坡积Q<sub>4</sub>黄土, 具黄褐色、肉眼

可见的大孔隙和水平状层理等特征。原状试样的基本物性指标如表1所示。动弹性模量和阻尼比试验参照《土工试验规程》(SL237—032—1999)进行操作, 试验仪器为WF—12440型动三轴-扭剪试验系统, 其应变测量范围可达0.001%。试验在固结不排水条件下进行。试样尺寸统一为Φ50 mm×100 mm。循环加载前对试样进行偏压固结, 轴向固结压力σ<sub>1c</sub>按地层压力计算, 侧向固结压力σ<sub>3c</sub>=K<sub>0</sub>σ<sub>1c</sub>, 固结比K<sub>0</sub>取0.59。待固结稳定后, 采用在一个试样上分级施加动荷载的方法向试样的轴向逐级由小到大施加动应力, 每级动应力的振次为10次, 循环剪切动应力级数为6~8级。模拟地震荷载选用频率为1 Hz的正弦波。

表1 试样的物性指标

Table 1 Physical indexes of samples					
试样 编号	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	天然 含水率/%	取样 深度/m	沉积 类型
DZA	1.55	1.45	7.07	2.0	残坡积
GNGS	1.69	1.46	15.99	2.0	残坡积
SMGL	1.64	1.42	15.47	2.0	冲洪积
NSMS	1.55	1.38	12.32	2.0	残坡积
	1.66	1.54	7.51	8.0	
HZSZ	1.39	1.31	6.17	2.0	冲洪积
	1.50	1.34	11.77	8.0	
LZS	1.59	1.45	9.75	8.0	残坡积
SLGY	1.75	1.49	17.12	8.0	残坡积

2 甘南黄土的动本构关系

根据动三轴试验结果, 绘制循环荷载作用下甘南地区黄土的σ<sub>d</sub>-ε<sub>d</sub>关系曲线, 如图1所示。

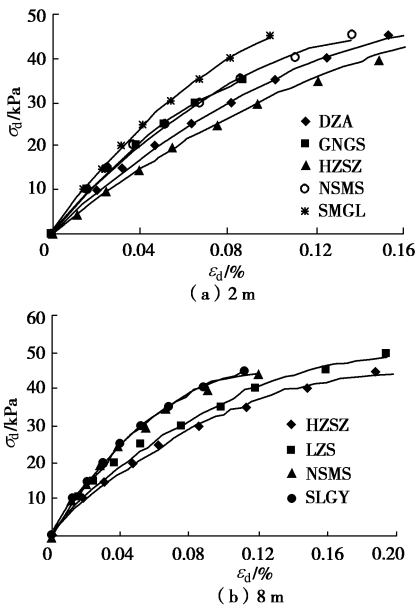


图1 甘南黄土的σ<sub>d</sub>-ε<sub>d</sub>关系曲线

Fig. 1 Curves of σ<sub>d</sub>-ε<sub>d</sub> of loess in Gannan region

其中, 图1(a)为取样深度2 m试样的试验结果, 图1(b)为取样深度8 m试样的试验结果。由图可知,

随着循环荷载幅值的增加, 动应变统一呈现先急剧增长后缓慢增长的非线性增长趋势; 循环荷载幅值的不断增大导致土体内部孔隙的压缩, 产生了一定的残余变形。循环荷载幅值相同时, 动残余应变的大小受固结压力和初始物性条件的影响: 8 m 的黄土围压较大, 一定幅值的循环荷载作用下的动残余应变较 2 m 的小; 固结压力相同时, 密度越大, 含水率越小的土一定幅值的循环荷载作用下的动残余应变越小。

根据动弹性模量的定义, 依据试验结果计算每一级循环荷载下甘南次生黄土的动弹性模量  $E_d$  和动弹性模量的倒数  $1/E_d$ , 绘制不同深度黄土的  $E_d - \sigma_d$  和  $1/E_d - \varepsilon_d$  关系曲线, 如图 2, 3 所示。

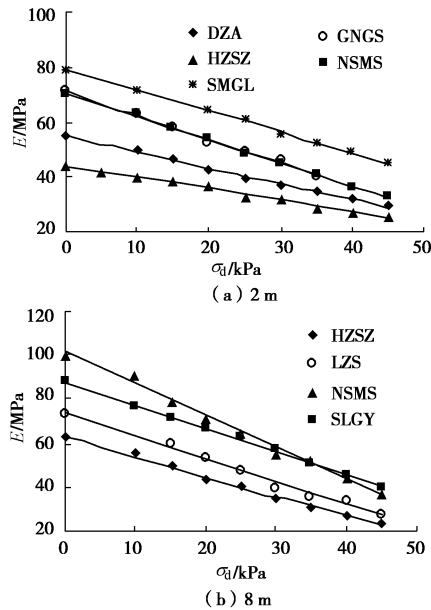


图 2 甘南黄土的  $E_d - \sigma_d$  关系曲线

Fig. 2 Curves of  $E_d - \sigma_d$  of loess in Gannan region

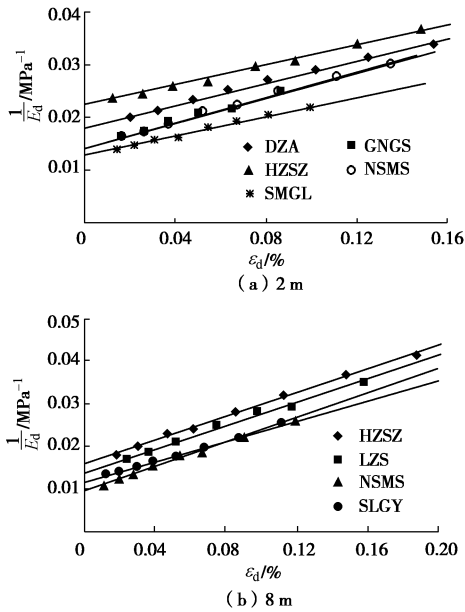


图 3 甘南黄土的  $1/E_d - \varepsilon_d$  关系曲线

Fig. 3 Curves of  $1/E_d - \varepsilon_d$  of loess in Gannan region

由图 2 可知, 不同深度次生黄土的  $E_d$  随着动应力的增加呈线性减小。初始动弹性模量  $E_{dmax}$  受固结条件影响显著; 固结条件相同时,  $E_{dmax}$  受天然密度和含水率影响较大; 固结条件相同、天然密度和含水率相近时, 残坡积黄土由于配较差, 压缩性较高, 其  $E_{dmax}$  较冲洪积黄土小。

根据图 3 可知, 不同深度次生黄土的动弹性模量的倒数  $1/E_d$  和  $\varepsilon_d$  动应变存在较好的线性相关关系, 即

$$\frac{1}{E_d} = a + b\varepsilon_d \quad (1)$$

相关系数为 0.9943~0.9987。而动弹性模量:

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 中, 并进行整理, 可得

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d} \quad (3)$$

表 2 双曲线模型参数

Table 2 Parameters of hyperbolic model

试样 编号	模型参数		相关系数 $R^2$
	$a/10^{-6}$	$b/10^{-3}$	
DZA	1.8283	1.0430	0.9965
GNGS	1.4157	1.2124	0.9955
SMGL	1.2622	0.9532	0.9981
NSMS-2	1.4250	1.1960	0.9983
HZSZ-2	2.2523	0.9492	0.9943
HZSZ-8	1.6049	1.3959	0.9971
NSMS-8	0.9950	1.3960	0.9964
LZS	1.3662	1.3886	0.9970
SLGY	1.1330	1.2064	0.9987

即甘南地区次生黄土的动本构关系符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型<sup>[8]</sup>。其中,  $a$ ,  $b$  为模型参数, 如表 2 所示。通过分析物性参数、固结压力与模型参数  $a$ ,  $b$  之间的关系发现, 尽管固结条件、密度和天然含水率等因素对次生黄土动力本构模型参数存在一定影响, 但模型参数与含水率、密度等物性参数和固结围压均不存在明显的相关性。

### 3 甘南黄土的动剪模量比和阻尼比特征

#### 3.1 动剪模量比随动剪应变的变化规律

土的动剪切模量  $G_d$  与动弹性模量  $E_d$ , 动剪应变  $\gamma_d$  与轴向动应变  $\varepsilon_d$  之间存在如下转换关系:

$$G_d = E_d / [2(1 + \nu)] \quad (4)$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d (1 + \nu) \quad (5)$$

$$G = G_0 / (1 + \gamma_d / \gamma_r) \quad (6)$$

根据动三轴试验得到的双曲线模型参数  $a$ ,  $b$  值可计算得到参考剪应变  $\gamma_r$ ; 利用动剪模量比  $G/G_0$  与  $\gamma_r$  之

间的关系(式(6))对试验结果进行非线性拟合计算,得到甘南地区不同深度次生黄土的  $G/G_0 - \gamma_d$  关系曲线,如图4所示。

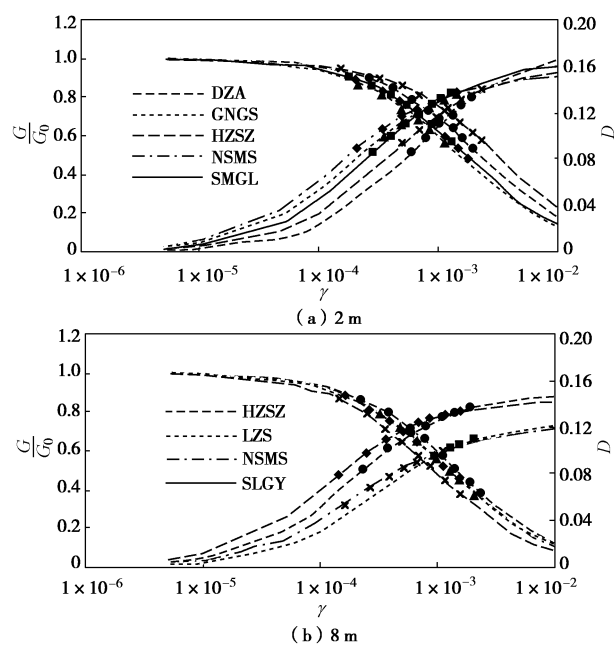


图4 甘南黄土的  $G/G_0 - \gamma_d$  和  $D - \gamma_d$  拟合关系曲线  
Fig. 4 Curves of  $G/G_0 - \gamma_d$  and  $D - \gamma_d$  of loess in Gannan region

由图可知,不同地区、不同深度次生黄土的动剪模量比  $G/G_0$  均随着动剪应变  $\gamma_d$  的增加而减小,且在  $\gamma_d=1 \times 10^{-4}$  时存在一个急剧减小的转折点。物性参数和固结条件对  $G/G_0$  的衰减趋势存在影响。固结围压相同时,天然含水率越小的黄土  $G/G_0$  衰减越慢;天然含水率相近的黄土,固结围压越大,  $G/G_0$  衰减越快。

在半对数坐标系中刻画一个负指数衰减模型描述甘南地区次生黄土的动剪模量比随动剪应变的衰减关系,如式(7)所示。其中,  $A$ ,  $B$  为模型参数。不同试样的模型参数及相关系数如表3所示。

$$G = G_0(Ae^{-B\gamma_d}) \quad (7)$$

表3 负指数模型参数

Table 3 Parameters of negative exponential model			
试样 编号	模型参数		相关系数 $R^2$
	$A$	$B$	
DZA	0.8803	-172.11	0.9419
GNGS	0.8562	-205.49	0.9418
SMGL	0.8648	-194.93	0.9418
NSMS-2	0.8469	-205.26	0.9323
HZSZ-2	0.9140	-149.22	0.9531
HZSZ-8	0.8170	-209.73	0.9082
NSMS-8	0.7647	-249.03	0.8954
LZS	0.7924	-220.49	0.9041
SLGY	0.8138	-224.95	0.9173

3.2 阻尼比变化特征

土的阻尼反映了动荷载作用下能量因土的内部阻力而损失变化的性质,表征了土的粘滞性对其动本构关系的影响<sup>[9]</sup>。根据试验结果,通过重复加荷卸荷滞回曲线法确定甘南地区次生黄土的阻尼比  $D$ ,并通过非线性拟合计算得到  $D - \gamma_d$  关系曲线,如图4所示。

由图可知,次生黄土的阻尼比随动应变的增大而增大,具有明显的非线性特征。随着  $\gamma_d$  的逐渐增大,  $D$  的增长呈现缓慢增加—急剧增加—趋于平稳的过程。图4(a)中,考虑黄土具有特殊的结构性和水敏性,相同的固结条件下阻尼比随动剪应变的增长过程主要受土体天然含水率的制约,且  $\gamma_d < 0.2\%$  时这一影响十分明显,含水率越小,  $D$  越小;而  $\gamma_d$  位于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  范围内时阻尼比随动剪应变的增长过程主要受密度的影响,密度越小,  $D$  越大。图4(b)中  $D$  的增长过程受围压的影响较为显著,围压越大,  $D$  增长越缓慢;而天然含水率和密度仍然是影响  $D$  增长过程的重要因素。在普通坐标系中可用一个对数函数模拟甘南地区次生黄土的阻尼比随动剪应变的增长关系,如式(8)所示。其中,  $M$ ,  $N$  为模型参数。不同试样的模型参数及相关系数如表4所示。

$$D = M \lg(\gamma_d) + N \quad (8)$$

表4 对数模型参数

Table 4 Parameters of logarithmic model			
试样 编号	模型参数		相关系数 $R^2$
	$M$	$N$	
DZA	0.0245	0.2760	0.9417
GNGS	0.0229	0.2775	0.9481
SMGL	0.0247	0.2917	0.9545
NSMS-2	0.0228	0.2803	0.9433
HZSZ-2	0.0240	0.2780	0.9577
HZSZ-8	0.0225	0.2726	0.9512
NSMS-8	0.0211	0.2668	0.9320
LZS	0.0187	0.2192	0.9579
SLGY	0.0180	0.2163	0.9512

4 次生黄土与风成黄土动剪模量比和阻尼比差异性

为了探讨次生黄土与风成黄土动剪模量比和阻尼比的差异性,选取兰州(LZ)、会宁(HN)两个场地的典型  $Q_3$  风成黄土进行对比试验,试验条件与甘南次生黄土的试验条件相同。试样的物性指标如表5所示。根据试验结果计算风成黄土的动剪模量比和阻尼比,并与物性指标相近的2组甘南黄土进行对比,绘制  $G/G_0 - \gamma_d$  和  $D - \gamma_d$  关系曲线,结果如图5所示。兰州、会宁黄土的双曲线模型参数如表6所示。

表 5 Q<sub>3</sub> 黄土试样的物性指标  
Table 5 Physical indexes of Q<sub>3</sub> eolian loess

试样 编号	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	天然 含水率/%	取样 深度/m	沉积 类型
LZ	1.79	1.54	16.52	4.0	风积
HN	1.61	1.44	11.81	4.0	

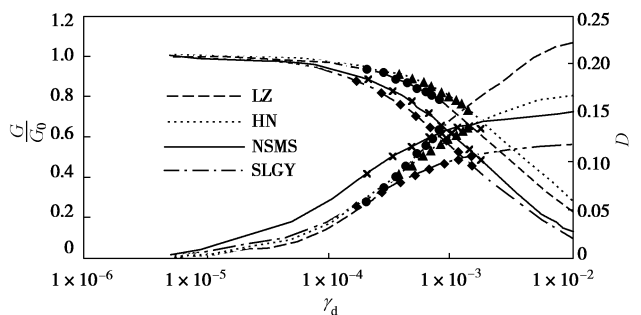


图 5 次生黄土与风积黄土动剪模量比和阻尼比拟合结果  
Fig. 5 Fitting results curves of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of redeposited loess and eolian loess

表 6 风成黄土的双曲线模型参数  
Table 6 Parameters of hyperbolic model for eolian loess

试样 编号	模型参数		相关系数 R <sup>2</sup>
	a/10 <sup>-6</sup>	b/10 <sup>-3</sup>	
LZ	1.0010	0.4453	0.9965
HN	1.2971	0.8354	0.9953
NSMS-2	1.4250	1.1960	0.9983
SLGY	1.1330	1.2064	0.9987
SLGY	1.1330	1.2064	0.9987

由图 5 中次生黄土与风成黄土  $G/G_0 - \gamma_d$  曲线的对比结果可知,次生黄土的  $G/G_0 - \gamma_d$  关系曲线形态与风成黄土的  $G/G_0 - \gamma_d$  关系曲线相似,但随着动剪应变  $\gamma_d$  的增大,其动剪模量比衰减较快,在  $\gamma_d > 5 \times 10^{-3}$  时转为平缓。而风成黄土的  $G/G_0$  随  $\gamma_d$  增加衰减较慢,且在  $5 \times 10^{-5} < \gamma_d < 1 \times 10^{-2}$  的变化范围内持续衰减。对于密度和天然含水率相近的次生黄土与风成黄土,由于风成黄土的沉积时间更长,固结更加充分,土颗粒之间的连接更加稳定,使得其具有比残坡积、冲洪积类型的次生黄土更强的抵抗动剪切变形的能力,动剪模量比衰减较慢。由图 5 中次生黄土与风成黄土  $D - \gamma_d$  曲线的对比结果可知,NSMS 黄土  $D$  在  $5 \times 10^{-6} < \gamma_d < 1 \times 10^{-2}$  的变化范围为 0.0048~0.1501,SLGY 黄土  $D$  在  $5 \times 10^{-6} < \gamma_d < 1 \times 10^{-2}$  的变化范围为 0.0027~0.1174; LZ 黄土  $D$  在  $5 \times 10^{-6} < \gamma_d < 1 \times 10^{-2}$  的变化范围为 0.0018~0.2222,HN 黄土  $D$  在  $5 \times 10^{-6} < \gamma_d < 1 \times 10^{-2}$  的变化范围为 0.0022~0.1688;可见,在固结条件一致、物性指标相近的情况下,风成黄土

$D$  的变化范围更大。次生黄土在  $\gamma_d < 10^{-4}$  时增长速率较风成黄土快,但在  $\gamma_d > 10^{-3}$  时增长速率趋于收敛;而风成黄土的  $D$  在  $10^{-4} < \gamma_d < 10^{-3}$  范围内急剧增长,尽管后期趋于收敛,但  $\gamma_d = 10^{-2}$  时的值较次生黄土的大,且仍具有一定的增大趋势。可见,相对于风成黄土,次生黄土的  $G/G_0$  受应变累积效应的影响较大,而  $D$  受应变累积效应的影响较小。

通过对比表 2, 6 可知,尽管次生黄土与风成黄土的动本构关系均符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型,但模型参数存在一定的差异性,表现在次生黄土的双曲线模型参数  $a$  值较风成黄土无明显差异,但  $b$  值可达到相同条件下风成黄土  $b$  值的 1.5~3 倍,说明黄土动力特性的差异性受沉积环境的影响较为显著。

5 结 论

(1) 甘南地区次生黄土的动本构关系符合 Hardin-Dinevich 双曲线模型,其相关系数大于 0.9943,模型参数  $a$ ,  $b$  与天然含水率、干密度等物性参数和固结围压不存在明显的相关性。

(2) 次生黄土的动剪模量比随动剪应变增大而减小,变化趋势满足负指数衰减模型;相同固结和物性条件下残坡积黄土的初始动弹性模量  $E_{dmax}$  较冲洪积黄土小。次生黄土的阻尼比随动剪应变的增大而增大,变化趋势服从对数关系;增长演化形态受固结条件和物性条件的影响显著。

(3) 沉积环境对黄土动力特性的差异性影响显著。固结条件一致、物性指标相近的情况下,次生黄土的  $G/G_0$  随着动剪应变  $\gamma_d$  的增大衰减较快, $D$  的变化范围更小, $D$  受应变累积效应的影响较弱。

参考文献:

[1] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

[2] 李启鹏, 程显尧, 蔡东艳. 地震荷载下的黄土动力特性[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1985(3): 9 - 37. (LI Qi-yao, CHENG Xian-yao, 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] 朱克廉, 周新赞, 蔡东艳. 黄土动模量和阻尼比的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1992, 24(2): 1288 - 1296. (ZHU Ke-lian, ZHOU Xin-zan, CAI Dong-yan. Experimental study on the dynamic modulus and damping

- ratio of loess[J]. Journal of Xi'an University Of Architecture And Technology (Natural Science Edition), 1992, **24**(2): 1288 - 1296. (in Chinese))
- [4] 王 峻, 王 强, 王杰民. 震后黄土动力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(4): 63 - 67. (WANG Jun, WANG Qiang, WANG Jie-min. Experimental study on the dynamic characteristics of post-earthquake loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, **37**(4): 63 - 67. (in Chinese))
- [5] 王建荣, 张振中, 王 峻, 等. 振动频率对原状黄土动本构关系的影响[J]. 西北地震学报, 1999, **21**(3): 310 - 314. (WANG Jian-rong, ZHANG Zhen-zhong, WANG Jun, et al. Effect of vibration frequency on dynamic constitutive relationship of loess [J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, **21**(3): 310 - 314. (in Chinese))
- [6] 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, WANG 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))
- [7] 吴志坚, 张泽忠, 王 平, 等. 甘南地区黄土残余应变特征研究和震陷灾害区划[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 113 - 117. (WU Zhi-jian, ZHANG Ze-zhong, WANG Ping, et al. Residual strain characteristics of loess and zoning of seismic subsidence in Gannan region of Gansu Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 113 - 117. (in Chinese))
- [8] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, **98**(7): 667 - 692.
- [9] 胡仲有, 骆亚生, 李 焱, 等. 不同地区黄土阻尼比变化特性试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, **30**(2): 167 - 172. (HU Zhong-you, LUO Ya-sheng, LI Yan, et al. Experimental study on damping ratio variation characteristics of loess in different areas[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, **30**(2): 167 - 172. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)