

文章编号: 1006-6616 (2017) 06-0935-08

磐安结构性黄土动阻尼特征及其演化规律研究

慕焕东¹, 孙萍², 李荣建¹, 朱思珍²

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 地震作用往往会导致结构性黄土动强度的衰减, 引发黄土滑坡、振陷等一系列地质灾害, 而强度的衰减与其阻尼特性密切相关, 因而结构性黄土的动态阻尼特征及其演化规律问题是岩土工程抗震的重要研究课题之一。为此, 以天水磐安结构性黄土为研究对象, 开展了天然、饱和条件下原状黄土和重塑黄土的动力学特性试验。在试验基础上, 分析并比较了黄土的动模量、动阻尼响应特征及其演化规律。研究表明: 天然、饱和条件下原状黄土和重塑黄土的动应力随动应变的增大而增大, 动模量随动应变的增大而减小, 动阻尼比随着动应变的增大而增大; 受黄土结构性的影响, 原状黄土的最大动模量比重塑黄土的稍大, 原状、重塑黄土的最大动模量比饱和原状、饱和重塑黄土的稍大; 黄土结构性较强时需要考虑试样固结应力对阻尼比的影响, 饱和重塑黄土可以忽略试样固结应力对阻尼比的影响。

关键词: 黄土; 结构性; 动阻尼; 动模量

中图分类号: P642

文献标识码: A

0 引言

黄土作为第四纪最为典型的一种沉积物, 其具有多孔隙、弱胶结、无层理、节理较为发育等性质。这些性质在外界环境影响下(如降雨、地震、人类活动等), 直接或间接的影响着黄土的力学行为, 造成一系列严重的灾害。例如, 降雨作用可造成黄土边坡失稳破坏, 地震作用可造成黄土滑坡、震陷及液化等一系列地质灾害^[1-3], 严重危害人民生命财产安全。地震作为一种突发性的地质灾害类型, 其经常会导致黄土强度的降低, 而强度的衰减与其黄土阻尼特性密切相关。因此, 研究地震作用下黄土的动阻尼特性及其演化规律, 对探讨结构性黄土动力响应规律具有重要理论意义, 对黄土地区工程抗震设计具有重要实际意义。

结构性一直是黄土力学研究中的热点问题之

一。至今, 关于黄土结构性方面的相关研究已硕果累累。谢定义^[4-6]等提出了可考虑黄土颗粒排列(几何特征)与联结(力学特征)的结构性定量指标—综合结构势, 分析结构性对黄土宏观力学特性的影响。邵生俊^[7-10]等提出了应力结构性参数及黄土的构度指标, 使得黄土结构性力学特性得到进一步深入研究, 随后陈存礼^[11]、骆亚生^[12]、邓国华^[13]等通过一系列黄土力学特性试验, 分别建立了孔隙比结构性参数、振次结构性参数、应力比结构性参数。Li Rong-jian 等^[14-15]通过试验研究建立了适用于结构性黄土的双曲线强度。Rinaldi 等^[16]、Capdevila 等^[17]等通过室内三轴试验, 研究了粉质黄土的结构性, 在此基础上建立了黄土的双线性模型。

黄土的动剪切模量比和阻尼比是黄土动力学特征的重要参数^[18-19]。但是, 通过室内动三轴试验获取黄土动力学参数, 进而考虑动力作用下黄

收稿日期: 收稿时间: 2017-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472296, 11072193); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(14JS064); 中国地质调查项目(DD20160271)

作者简介: 慕焕东(1989-), 男, 助理实验师, 地质工程专业, 主要从事岩土工程试验测试分析及模型试验方面的研究工作。E-mail: mhdyhx@xaut.edu.cn

通讯作者: 孙萍(1978-), 女, 博士, 副研, 主要从事工程地质、地质灾害方面的研究工作。E-mail: sunpingcgs@163.com

土结构性变化规律对研究结构性黄土具有更重要的实际工程意义。孙萍等^[20]分析了磐安结构性黄土的构度及动强度衰减特性；胡仲有^[21-22]分析了不同地区黄土阻尼比变化特性。田堪良^[23-24]提出了基于强度条件的黄土动力结构性参数。慕焕东等^[25]通过对西安地裂缝带黄土试样进行不同围压下的动三轴试验，获得了地裂缝带黄土试样的动力学参数，对分析研究地裂缝场地在地震作用下其地震响应具有一定的实际意义。综上，现有文献多集中于结构性黄土静力学特性相关方面研究，其主要分析其力学机制及灾变演化机理；而对于地震动力作用下，结构性黄土的动力特性及其演化规律，尤其是结构性黄土的阻尼特性衰减规律还缺乏相应的研究。

为此，通过循环荷载作用下室内固结不排水动三轴试验，获得了循环荷载作用下磐安结构性黄土动应力与动应变关系曲线，研究磐安结构性黄土动模量、动阻尼特征及其演化规律，考虑了天然及饱和两种含水率及原状与重塑两种土性，分析了结构性对阻尼特性的影响。所得结构性黄土动力学参数可直接应用于结构性黄土场地抗震设计。

1 黄土的构度及结构性

结构性黄土的构度指标是评价其结构性强弱的重要参数，其主要借鉴综合结构势思想，基于无侧限抗压强度试验展示原状黄土、重塑黄土及饱和黄土的强度差异。首先，通过原状黄土抗压强度和重塑黄土抗压强度的比值可以得到黄土的结构可稳性；其次，通过饱和原状黄土抗压强度与原状黄土抗压强度的比值可以得到黄土的结构可变性。因此，黄土的构度指标可通过其结构可稳性与结构可变性之比来表达^[10]。

磐安黄土的构度指标为 7.0，远远大于饱和正常固结黄土的构度指标（1.0）^[13]，可见磐安黄土的结构性较强。因此，通过室内动三轴试验，分析不同含水率条件下磐安原状及重塑黄土的动模量、动阻尼特性，进而分析并比较其衰减规律。

2 试验方案

试验所用黄土试样取自甘肃省天水市甘谷县磐安镇，试样的取土深度为 13.0 m（含原状和重

塑黄土），分别在天然含水率及饱和状态下进行动三轴试验。重塑黄土的干密度及含水率与原状黄土的干密度及含水率相同，其基本物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 试样的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of the sample					
干密度 ρ_d (g/cm^3)	含水率 w /%	比重 G_s	塑限 w_p /%	液限 w_l /%	孔隙比 e_0
1.45	13	2.67	18.8	27.9	0.887

试验所用试样尺寸为直径 39.1 mm 高 80 mm 的圆柱试样，试样采用抽真空进行饱和，饱和度控制为 95%。试样饱和时，首先将制备好的完整试样装入内壁涂抹均匀厚度的凡士林的饱和器内，固定饱和器的两端，将固定好的饱和器放入真空缸内，盖好缸盖；然后启动抽气机，当真空压力表读数接近一个大气压力值时，开启管夹往缸内注水，注水时应保持真空压力表读数不变，待水淹没饱和器时停止注水，同时停止抽气；最后，开管夹使空气进入真空缸，静止一段时间（ ≥ 10 h），取出试样称重并计算饱和度。

试验中不同类型的试样采用不同的制样方法：对于原状土试样，遵循“先成型、后加工、再精琢”的原则，试样质量精确至 0.1 g；对于重塑土试样，基本可分为“碾压-过筛-烘干-配土-制样”五个步骤，制样时要求复测的含水率与要求的含水率差值小于 1%。

试验仪器采用微机控制多功能三轴试验机，试验输入振动波形为正弦波，其频率为 1 Hz，固结应力比为 1，试样固结应力分别取为 100、200、300 kPa。对每个试样分级施加逐级增长的动应力，每级振动 5 次，同时采集动应力、动应变，对于饱和黄土试样，以孔隙水压力完全消散作为固结标准，对于非饱和黄土试样，以压缩变形稳定作为固结标准。

3 结果分析

3.1 动模量

在均压固结情况下，按动应力和动应变的峰值做出动应力与动应变关系曲线，根据该关系整理出不同动应变时的动模量，做出动模量与动应变关系曲线。图 1~图 4（图中 ρ_d 表示试样的干密度， K_c 表示固结应力比， σ_{3c} 表示试样的固结应力， $\sigma_d \sim$

σ_d 、 $E_d \sim \varepsilon_d$ 分别表示动应力与动应变关系曲线、动模量与动应变关系曲线) 给出了原状和重塑黄土分

别在天然含水率及饱和状态下的动应力与动应变关系曲线、动模量与动应变关系曲线。

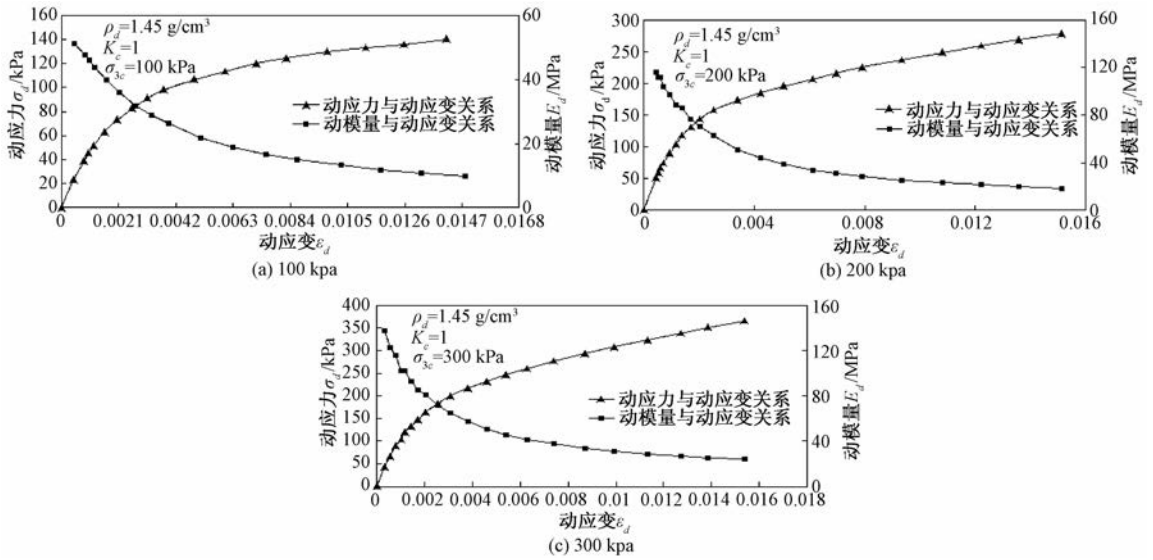


图 1 天然含水率原状黄土 $\sigma_d \sim \varepsilon_d$ 、 $E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线图

Fig. 1 $\sigma_d \sim \varepsilon_d$ 、 $E_d \sim \varepsilon_d$ curves of undisturbed loess with natural moisture content

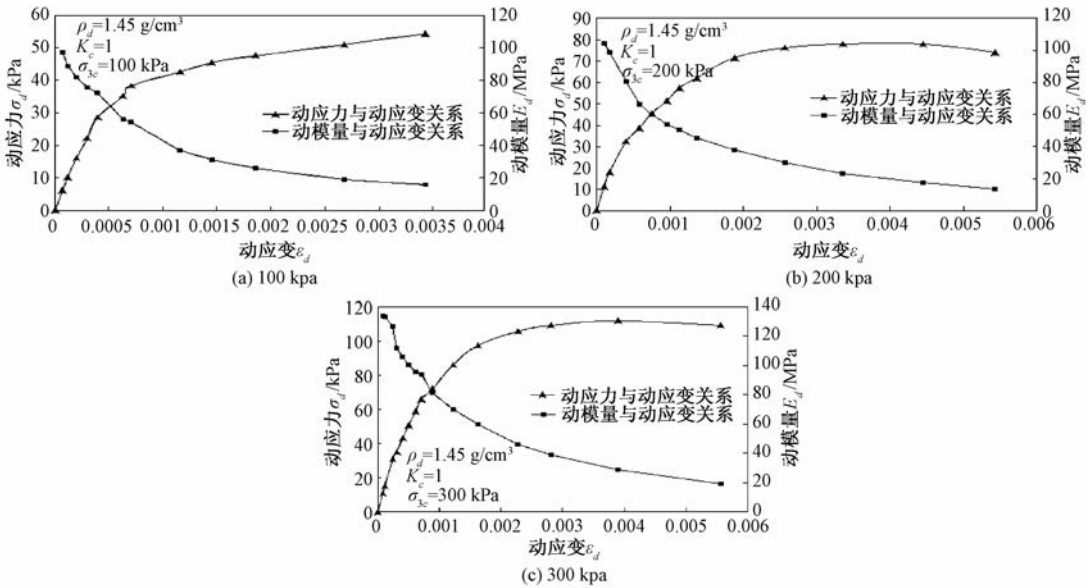


图 2 饱和含水率原状黄土 $\sigma_d \sim \varepsilon_d$ 、 $E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线图

Fig. 2 $\sigma_d \sim \varepsilon_d$ 、 $E_d \sim \varepsilon_d$ curves of undisturbed loess with saturated moisture content

不同含水率条件下, 原状黄土和重塑黄土的动应力均随着动应变的增加而逐渐增加, 但增加的幅度却不尽相同, 表现出随着动应变的增加, 其增幅逐渐减小, 即动应力与动应变关系曲线的斜率逐渐趋于平缓, 而动模量却表现出相反的趋势 (见图 1—图 4), 同时动应力与动应变关系曲线呈双曲线型且受试样固结应力的影响而变化, 即同一动应变下, 动应力随试样固结应力的增加而增加。可见,

含水量对黄土的动应力及最大动模量有显著影响, 当含水率由天然含水率增加到饱和含水率时, 原状、重塑黄土的动模量显著降低, 黄土颗粒之间的联结也不断被溶解破坏; 同时由于原状黄土的原生结构性, 其最大动模量比重塑黄土的稍大。

根据不同含水率条件下原状、重塑黄土的动应力与动应变关系曲线可知, 若动应力与动应变关系曲线满足双曲线模型, 则动模量倒数与动应

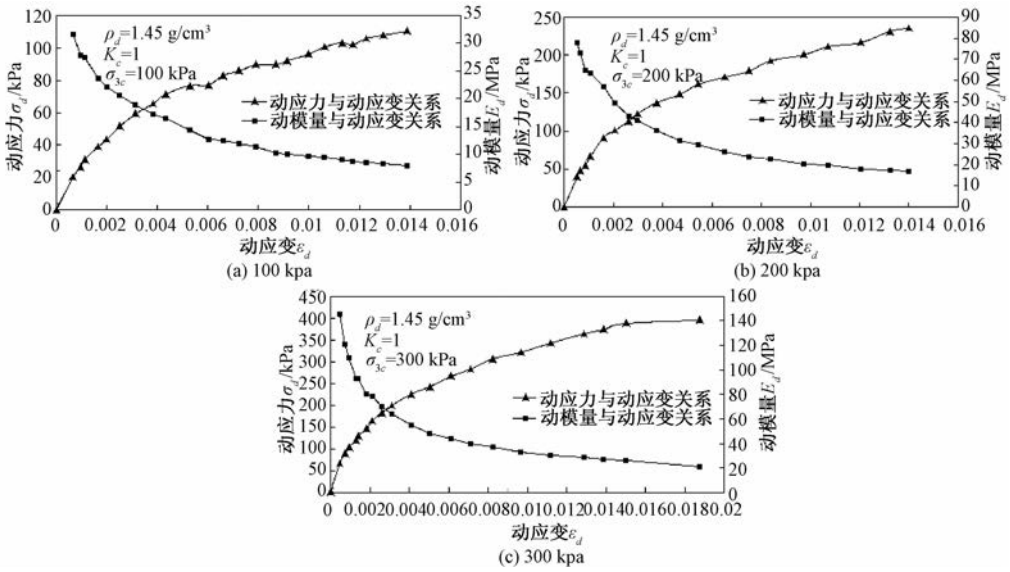


图3 天然含水率重塑黄土 $\sigma_d \sim \epsilon_d$ 、 $E_d \sim \epsilon_d$ 关系曲线图

Fig. 3 $\sigma_d \sim \epsilon_d$ 、 $E_d \sim \epsilon_d$ curves of remodeling loess with natural moisture content

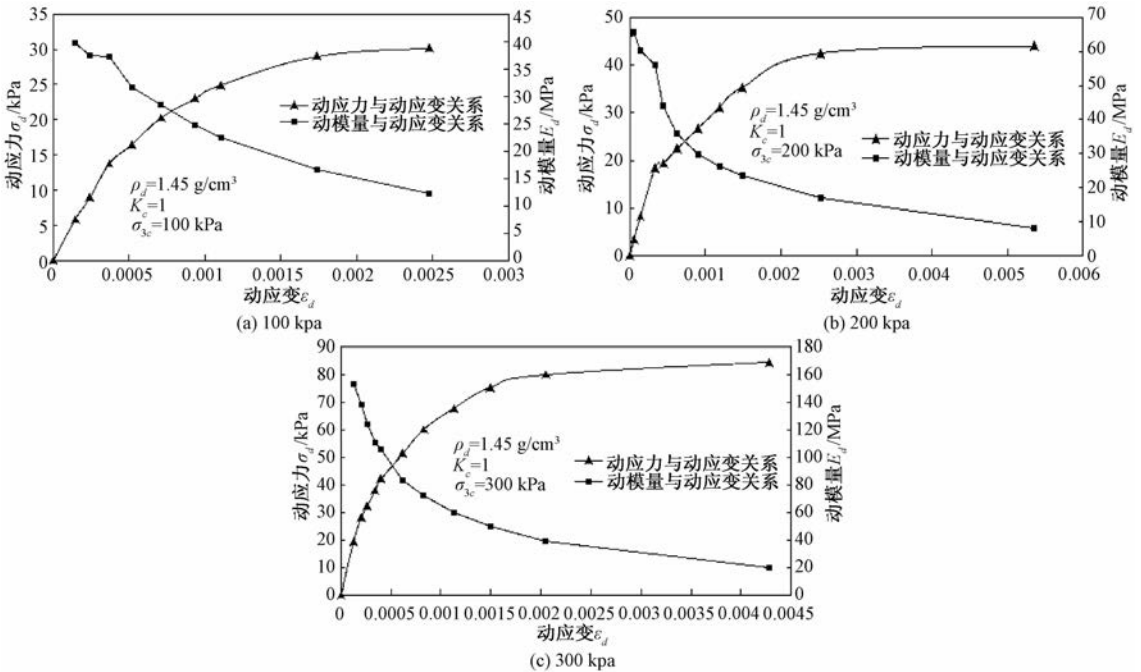


图4 饱和重塑黄土 $\sigma_d \sim \epsilon_d$ 、 $E_d \sim \epsilon_d$ 关系曲线图

Fig. 4 $\sigma_d \sim \epsilon_d$ 、 $E_d \sim \epsilon_d$ curves of remodeling loess with saturated moisture content

变幅值之间将满足线性关系，即：

$$1/E_d = a + b\epsilon_d \quad (1)$$

式中： a 、 b 为土的试验参数。显然， $1/a$ 为原点的斜率，即初始（最大）动剪切模量。

若动应力与动应变关系曲线满足双曲线模型，则动模量倒数与动应变幅值之间将满足线性关系（见图5~图8，图中 ρ_d 表示试样的干密度， K_c 表

示固结应力比， $1/E_d \sim \epsilon_d$ 表示动模量倒数与动应变关系曲线）。根据不同结构试样的动三轴试验可知，由于重塑过程破坏了黄土的结构性，使得其动应力与动应变关系曲线较原状黄土之间存在一定的差异性，表现为动模量倒数与动应变关系曲线的线性相关性较差，即满足双曲线模型相关性较差。同时，根据动模量倒数与动应变关系曲线

在应变为零时的模量, 可以得到不同围压下的初始模量 (见表 2, 表中 a, b 为土的试验参数, E_{dmax} 为初始模量)。不同试样的初始模量随着试样固结应力的增大而增大, 但由于重塑过程及饱和过程使得重塑黄土的结构性大大降低, 使得原状黄土、重塑黄土、饱和原状黄土、饱和重塑黄土的初始模量表现出一定的规律性, 即: 原状黄土 > 重塑黄土, 原状、重塑黄土 > 饱和原状、重塑黄土。

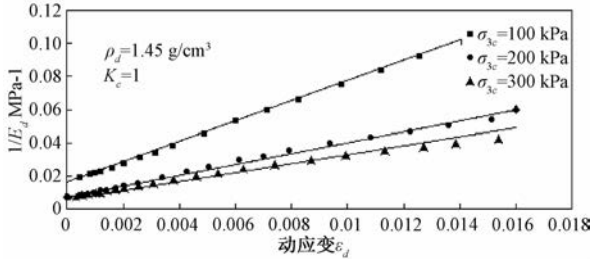


图 5 天然含水率原状黄土 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线
Fig. 5 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ curves of undisturbed loess with natural moisture content

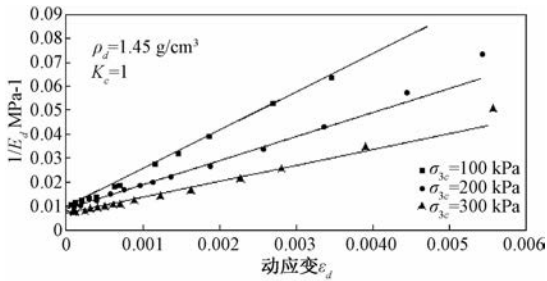


图 6 饱和含水率原状黄土 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线
Fig. 6 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ curves of undisturbed loess with saturated moisture content

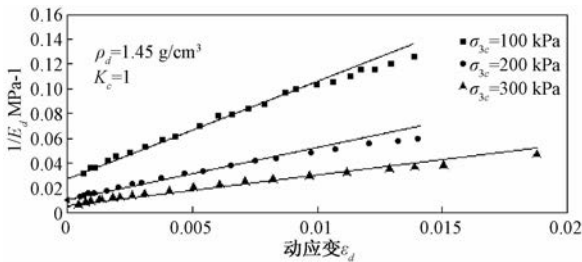


图 7 天然含水率重塑黄土 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线
Fig. 7 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ curves of remodeling loess with natural moisture content

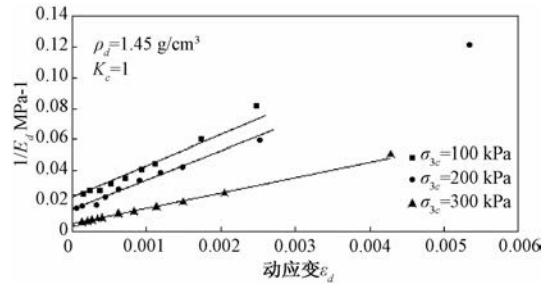


图 8 饱和含水率重塑黄土 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ 关系曲线
Fig. 8 $1/E_d \sim \varepsilon_d$ curves of remodeling loess with saturated moisture content

表 2 动模量线性回归参数

Table 2 Parameters of linear regression of dynamic modulus

类型	固结围压/ kPa	回归参数		
		$a/10^{-3}$ (MPa^{-1})	b (MPa^{-1})	E_{dmax} (MPa^{-1})
原状黄土	100	16.50	6.11	60.6
	200	7.50	3.28	133.3
	300	6.00	2.69	166.7
原状饱和黄土	100	9.60	16.04	104.2
	200	8.90	10.02	112.4
	300	6.90	6.65	144.9
重塑黄土	100	27.00	7.90	37.0
	200	9.80	4.27	102.0
	300	5.13	2.47	194.9
重塑饱和黄土	100	23.00	20.00	43.5
	200	10.00	10.37	100.0
	300	5.50	9.93	181.8

变关系曲线画在同一坐标系上, 如图 9 ~ 图 12 (图中 ρ_d 表示试样的干密度, K_c 表示固结应力比, $\lambda \sim r_d$ 表示动阻尼比与动剪应变关系) 所示。

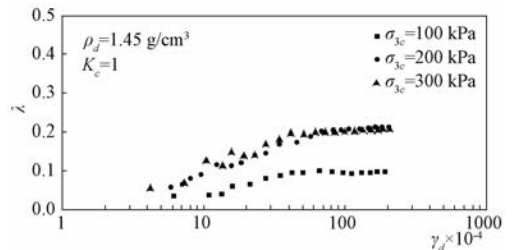


图 9 天然含水率原状黄土的 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线
Fig. 9 $\lambda \sim \gamma_d$ curves of undisturbed loess with natural moisture content

3.2 阻尼比

阻尼比根据选定振次 ($N = 1$) 一个周期内各时刻的动应力和动应变得出的滞回圈大小计算得出。把不同试样固结应力下的动阻尼比与动剪应

对于原状黄土, 由于结构性的影响, 使试样固结应力对 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线影响较大, $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线随试样固结应力的增大而上移, 即同一动应变下, 阻尼比随着试样固结应力的增大而增大, 且试样固结应力 (小于 100 kPa) 较小时, 其影响较大, 试样固结应力 (大于等于 200 kPa) 较大

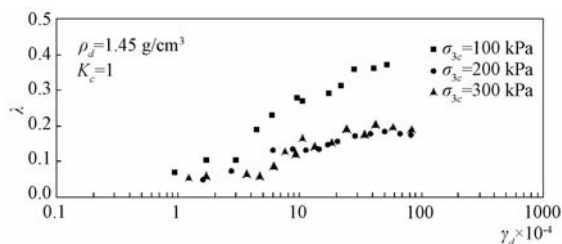


图 10 饱和含水率原状黄土的 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线

Fig. 10 $\lambda \sim \gamma_d$ curves of undisturbed loess with saturated moisture content

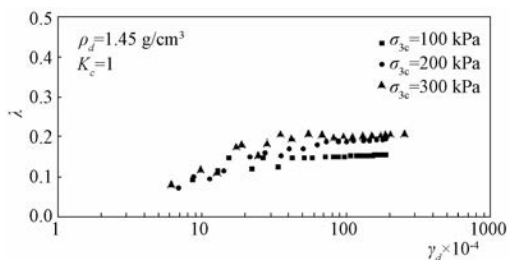


图 11 天然含水率重塑黄土的 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线

Fig. 11 $\lambda \sim \gamma_d$ curves of undisturbed loess with natural moisture content

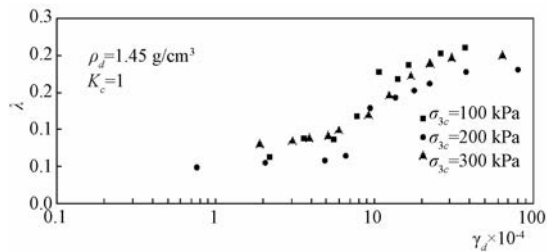


图 12 饱和含水率重塑黄土的 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线

Fig. 12 $\lambda \sim \gamma_d$ curves of undisturbed loess with saturated moisture content

时, 其影响很小, 不同试样固结应力下阻尼比试验点分布在一个相对较为密集的范围 (见图 9)。

对于饱和原状黄土, 由于饱和和使其结构性明显减小, 试样固结应力起到压密作用, 使试样固结应力对 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线影响较大, $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线随试样固结应力的增大而下移, 即同一动应变下, 阻尼比随着试样固结应力的增大而减小, 且试样固结应力 (小于 100 kPa) 较小时, 其影响较大, 试样固结应力 (大于等于 200 kPa) 较大时, 其影响很小, 不同试样固结应力下阻尼比试验点分布在一个相对较为密集的范围 (见图 10)。

对比分析原状黄土、饱和原状黄土动阻尼比与动剪应变关系曲线变化规律可知, 原状黄土及

饱和原状黄土动阻尼比随着动剪应变的增大均呈增大趋势, 但原状黄土阻尼比随着试样固结应力的增大而增大, 饱和原状黄土阻尼比随着试样固结应力的增大而减小。

对于重塑黄土, $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线随试样固结应力的增大而上移, 即同一动应变下, 阻尼比随着试样固结应力的增大而增大, 但与原状黄土相比, 重塑试样结构性遭到破坏, 试样固结应力的影响较小 (见图 11)。

对于饱和重塑黄土, 由于重塑及饱和使其结构性基本消失, 处于正常固结状态, 使试样固结应力对 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线影响很小, 不同试样固结应力下阻尼比试验点分布在一个较为密集的范围 (见图 12)。

对比分析重塑黄土、饱和重塑黄土 $\lambda \sim \gamma_d$ 关系曲线变化规律可知, 重塑黄土及饱和重塑黄土动阻尼比随着动剪应变的增大均呈增大趋势, 但重塑黄土阻尼比随着试样固结应力的增大而增大, 饱和重塑黄土阻尼比对试样固结应力的响应很小。综上分析, 除饱和重塑黄土外, 不同试验条件下皆需要考虑试样固结应力对阻尼比的影响。

4 结论

通过室内动三轴试验, 对比研究了天然含水率、饱和含水率条件下原状黄土与重塑黄土的动模量和阻尼特性, 得出如下结论:

(1) 天然、饱和条件下原状黄土和重塑黄土的动应力随动应变的增加而增加, 动模量随动应变的增加而减小; 受黄土结构性的影响, 原状黄土的最大动模量比重塑黄土的稍大, 原状、重塑黄土的最大动模量比饱和原状、重塑黄土的稍大。

(2) 原状黄土及饱和原状黄土动阻尼比随着动剪应变的增大均呈增大趋势, 但原状黄土阻尼比 λ 随着试样固结应力的增大而增大, 饱和原状黄土阻尼比 λ 随着试样固结应力的增大而减小。

(3) 重塑黄土及饱和重塑黄土动阻尼比随着动剪应变的增大均呈增大趋势, 但重塑黄土阻尼比随着试样固结应力的增大而增大, 饱和重塑黄土阻尼比对试样固结应力的响应很小。可见, 除饱和重塑黄土外, 不同试验条件下皆需要考虑试样固结应力对阻尼比的影响。

参考文献/References

- 特征及其形成机制 [J]. 地质力学学报, 2016, 22 (1): 12 ~ 24.
- LI Hao, YANG Weimin, HUANG Xiao, et al. Characteristics and deformation mechanism of Shuiwan seismic loess landslide in Maiji, Tianshui [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22 (1): 12 ~ 24. (in Chinese with English abstracts)
- [2] 岳高伟, 李稳哲, 王辉, 等. 汶川地震中唐家山滑坡稳定性研究 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (2): 188 ~ 197.
- YUE Gaowei, LI Wenzhe, WANG Hui, et al. Stability research of Tangjiashan landslide in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (2): 188 ~ 197. (in Chinese with English abstracts)
- [3] 张铎, 吴中海, 李家存, 等. 国内外地震滑坡研究综述 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (3): 225 ~ 241.
- ZHANG Duo, WU Zhonghai, LI Jiacun, et al. An overview on earthquake-induced landslide research [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (3): 225 ~ 241. (in Chinese with English abstracts)
- [4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (1): 1 ~ 13.
- XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (1): 1 ~ 13. (in Chinese with English abstract)
- [5] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21 (6): 651 ~ 656.
- XIE Dingyi, QI Jiling. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (6): 651 ~ 656. (in Chinese with English abstract)
- [6] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形-强度的关系 [J]. 水利学报, 1999, (10): 1 ~ 6.
- XIE Ding-yi, QI Ji-ling, ZHU Yuanlin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, (10): 1 ~ 6. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (4): 531 ~ 536.
- SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (4): 531 ~ 536. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邵生俊, 邓国华. 原状黄土的结构强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用 [J]. 土木工程学报, 2008, 41 (11): 93 ~ 98.
- SHAO Shengjun, DENG Guohua. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (11): 93 ~ 98. (in Chinese with English abstract)
- [9] 邵生俊, 龙吉勇, 杨生, 等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (10): 1668 ~ 1672.
- SHAO Shengjun, LONG Jiyong, YANG Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (10): 1668 ~ 1672. (in Chinese with English abstract)
- [10] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其实验确定方法 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (1): 15 ~ 19.
- SHAO Shengjun, ZHENG Wen, WANG Zhenghong, et al. Structural index of loess and its testing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (1): 15 ~ 19. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (11): 1891 ~ 1896.
- CHEN Cunli, HU Zaiqiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (11): 1891 ~ 1896. (in Chinese with English abstract)
- [12] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (24): 4248 ~ 4251.
- LUO Yasheng, XIAN Dingyi, SHAO Shengjun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (24): 4248 ~ 4251. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邓国华, 邵生俊. 基于真三轴试验的黄土结构性变化规律研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (3): 679 ~ 684.
- DENG Guohua, SHAO Shengjun. Research on change structural characteristics of loess based on true triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (3): 679 ~ 684. (in Chinese with English abstract)
- [14] Li R J, Liu J D, Yan R, et al. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula [J]. Water Science and Engineering, 2014, 7 (3): 319 ~ 330.
- [15] Li R J, Liu J D, Yan R, et al. Evaluation of loess landslide disaster based on the developed hyperbola strength of structural loess [J]. Disaster Advances, 2013, 6: 316 ~ 326.
- [16] Rinaldi V A, Capdevila J A. Effect of cement and saturation on the stress-strain behavior of a silty clay [A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils [C]. Carefree, Arizona, United States: American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 2006, 147: 1157 ~ 1168.
- [17] Capdevila J A, Rinaldi V A. Stress-strain behavior of a heterogeneous and lightly cemented soil under triaxial compression test [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20 (16): 6745 ~ 6760.
- [18] Zhang J F, Andrus R D, Juang C H. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (4): 453 ~ 464.
- [19] 尚守平, 卢华喜, 任慧, 等. 动荷载作用下土阻尼比的试验

- 对比研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26 (2): 161 ~ 165.
- SHANG Shouping, LU Huaxi, REN Hui, et al. Laboratory experimental comparative study on damping ratio of soil subjected to dynamic loading [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26 (2): 161 ~ 165. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙萍, 李荣建, 刘军定, 等. 磐安结构性黄土的构度及动强度衰减特性 [J]. 科技导报, 2016, 34 (5): 74 ~ 78.
- SUN Ping, LI Rongjian, LIU Junding, et al. Structural index and dynamic strength attenuation characteristics of structural loess in Pan'an [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34 (5): 74 ~ 78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 胡仲有, 骆亚生, 李焱. 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 Zhongyou, LUO Yasheng, LI Yan. Experimental study on damping ratio variation characteristics of loess in different areas [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2010, 30 (2): 167 ~ 172. (in Chinese with English abstract)
- [22] 胡仲有. 不同地区黄土的动力特性及其结构性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- HU Zhongyou. Study on dynamic behavior and structure characteristics of loess in different areas [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [23] 田堪良, 张慧莉. 基于强度条件的黄土结构性动力试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (11): 2356 ~ 2361.
- TIAN Kanliang, ZHANG Huili. Dynamminc test study of loess structural property based on strength conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29 (11): 2356 ~ 2361. (in Chinese with English abstract)
- [24] 田堪良. 黄土的结构性及其动力特性的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- TIAN Kanliang. Study on structure characteristics and dynamic behavior of loess [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2003. (in Chinese)
- [25] 慕焕东, 邓亚虹, 彭建兵. 西安地区地裂缝带黄土动力特性试验研究 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (5): 951 ~ 957.
- Mu Huandong, Deng Yahong, Peng Jianbing. Experiment research on ground fissure belt loess dynamic characteristics in Xi'an area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22 (5): 951 ~ 957. (in Chinese)

DYNAMIC DAMPING CHARACTERISTICS AND EVOLUTION LAW OF PAN'AN STRUCTURAL LOESS

MU Huandong¹, SUN Ping², LI Rongjian¹, ZHU Sizhen²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Seismic action often leads to the decay of dynamic strength of structural loess and a series of geological disasters such as loess landslide and depression, and attenuation of intensity is closely related to its damping characteristics, which makes dynamic damping characteristics of structural loess and its evolution law one of the important research topics of geotechnical engineering. In this article, the dynamic characteristics of undisturbed loess and remolded loess under natural and saturated conditions were studied. On the basis of experiments, the dynamic modulus, dynamic damping response characteristics and evolution law of loess are analyzed and compared. The results show that: (1) The dynamic stress of the original loess and remolded loess increases with the increase of the dynamic strain, while the dynamic modulus decreases with the increase of the dynamic strain, and the dynamic damping ratio increases with the increase of the dynamic strain; (2) Affected by structural properties of loess, the undisturbed loess is slightly larger than that of the remolded loess, and the maximum modulus of the undisturbed loess and remolded loess are slightly larger than that of saturated undisturbed loess and saturated remolded loess. The influence of the surrounding pressure on the damping ratio needs to be considered when the loess structure is strong, and the effect of the surrounding pressure on the damping ratio can be neglected by the saturated remolded loess.

Key words: Loess; structural; dynamic damping; dynamic modulus