

DOI: 10.11779/CJGE2022S1029

含水率对原状黄土小应变剪切模量影响的试验研究

简涛^{1,2}, 孔令伟¹, 柏巍¹, 王俊涛^{1,2}, 刘炳恒^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点试验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土的小应变剪切模量及其衰减模式是分析评价土体对地震、工程施工等振动响应的重要依据。开展了不同含水率原状黄土的共振柱试验, 分析了含水率和围压对黄土小应变剪切模量的影响。结果表明: 含水率和围压对原状黄土剪切模量及其衰减模式影响显著。在同一含水率下, 剪切模量随围压增大而增大, 而含水率增加则导致剪切模量减小, 并且围压越小, 含水率越高, 剪切模量随剪应变增长衰减越快。根据试验结果, 分析了 Hardin 公式中拟合参数 A , n 与含水率之间的关系, 并建立了考虑含水率的修正 Hardin 公式预测原状黄土最大剪切模量 G_{\max} 。

关键词: 原状黄土; 含水率; 共振柱试验; 小应变剪切模量

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0160-06

作者简介: 简涛(1993—), 男, 博士, 主要从事特殊土的力学特性的研究工作。E-mail: focusjian@126.com。

Experimental study on effects of water content on small-strain shear modulus of undisturbed loess

JIAN Tao^{1,2}, KONG Ling-wei¹, BAI Wei¹, WANG Jun-tao^{1,2}, LIU Bing-heng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The small-strain shear modulus and degradation mode of soils provide the important fundamental information for analyzing and evaluating the dynamic response of soils to earthquake in geotechnical engineering. The resonant column tests on the undisturbed loess with different water contents and confining pressures are carried out to investigate the effects of the water content and confining pressure on the small-strain shear modulus. The results show that the water content and confining pressure have significant effects on the shear modulus and degradation mode of the undisturbed loess. More specifically, under the same water content, the shear modulus increases with an increase in the confining pressure, while an increase in the water content leads to a decrease in the shear modulus. The loess with high water content and low confining pressure shows faster shear modulus degradation. According to the test results, the correlation between the fitting parameters A and n in Hardin's equation and the water content is analyzed, based on which a modified Hardin's equation considering the water content is established to predict the maximum shear modulus G_{\max} of the undisturbed loess.

Key words: undisturbed loess; water content; resonant column test; small-strain shear modulus

0 引言

黄土广泛分布于中国西北干旱-半干旱的黄土高原地区, 该地区地形起伏复杂并处于构造运动活跃期, 地震活动强烈, 由地震引发的大量地质灾害给当地人民生命财产造成了重大损失。近年来, 国家促进西部地区快速发展, 黄土地区工程建设增多, 一些常用的地基处理方法(如强夯)会产生强烈的脉冲振动, 对邻近建筑产生不利影响。这使得振动荷载下黄土动力响应研究极为重要, 它能够为黄土地区抗震设防等级评定和建筑抗震设计提供依据^[1-3]。然而, 天然黄土具有颗粒松散排列, 孔隙比高的亚稳定结构, 对水反应敏感, 是一种典型的特殊土, 因此在评估黄土动力特

性时既要遵循土动力学方法, 还要考虑黄土自身的特殊性。含水率是控制黄土物理力学性质的主要因素之一, 对黄土强度有重要影响^[4], 同时在研究黄土动力特性时也需要重点关注^[1]。

土的剪切模量是分析土体对地震、工程施工等振动响应的重要土动力学参数^[2-3]。共振柱试验是测量土体小应变剪切模量的理想方法, 具有操作简便, 可靠性高等优点, 已在土的动力特性测试中广泛应用^[2, 5-13]。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505304); 国家自然科学基金项目(41772339, 41877281)

收稿日期: 2022-09-28

*通信作者(E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

目前, 一些研究已经通过共振柱试验探究了黄土动剪切模量与围压^[8-12]及黄土物理指标(如干密度^[8], 含水率^[9-12]和含砂量^[11-12])之间的关系。还从非饱和土的角度, 讨论了吸力对黄土剪切模量及其衰减模式的影响^[2, 13]。徐洁等^[2]研究发现在干湿循环过程中非饱和黄土的初始剪切模量 G_0 随吸力变化同步增减, 并通过压汞试验揭示了小孔隙增多导致毛细水占比增加是初始剪切模量 G_0 增加的主要原因; Ng 等^[13]研究了制样方式(重塑、压实和原状)对黄土动力特性的影响, 结果表明, 在初始状态下制样方式对黄土归一化剪切模量 (G/G_{\max}) 衰减模式影响不大, 但在高吸力条件下影响显著, 且剪切模量衰减比初始状态快, 并认为吸力增加引起黏土团聚是导致黄土试样剪切模量衰减模式差异的主要原因。对于非饱和黄土, 虽然吸力是控制其剪切模量大小的主要机制之一, 但是吸力测试费时且野外测量困难。然而, 含水率是黄土力学性质的简单有效指标, 显然建立考虑含水率的黄土小应变剪切模量表征方式具有实际应用意义。

本文在不同围压下对不同初始含水率原状黄土试样进行共振柱试验, 研究含水率和围压对原状黄土剪切模量衰减模式及最大剪切模量 G_{\max} 的影响, 并根据试验结果建立考虑含水率的原状黄土最大剪切模量 G_{\max} 估算方程。

1 试样准备和试验方法

1.1 试验材料和试样准备

试验黄土取自甘肃兰州某边坡顶部以下 3~4 m 处, 其基本物理指标如表 1 所示。原状黄土天然含水率为 7.14%, 干密度为 1.40 g/cm³, 塑性指数为 11.8。颗粒分布如图 1 所示, 该黄土以粉粒(80.78%)为主, 含少量黏粒和砂粒。

不同含水率原状黄土试样通过增(减)湿法制备得到。首先将从现场取回的大块原状黄土试样(25 cm×25 cm×25 cm)分割成小块, 再切削成直径 50 mm, 高 100 mm 的圆柱形试样, 然后对试样进行风干减湿或滴加蒸馏水增湿, 目标含水率分别为 3.0%, 7.0% (天然含水率), 10.0%, 14.0%, 18.0%。处理好的试样用保鲜膜包裹并放置于保湿皿中静置 72 h, 使试样水充分均匀。

表 1 兰州黄土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of Lanzhou loess

天然含水率 $w/\%$	相对质量 密度 G_s	干密度 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	颗粒组成/ $\%$		
						黏粒 ($<5 \mu m$)	粉粒 ($5 \sim 75 \mu m$)	砂粒 ($>75 \mu m$)
7.14	2.78	1.40	17.9	29.7	11.8	10.36	80.78	8.86

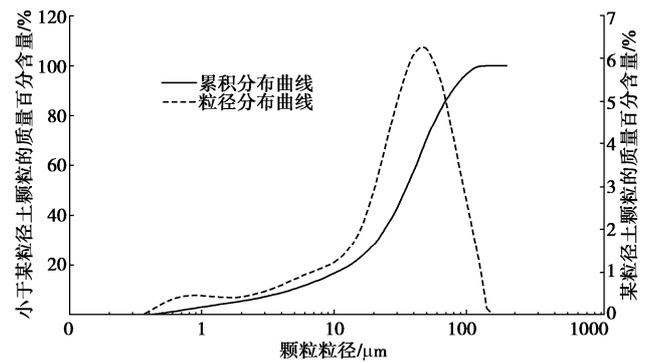


图 1 兰州黄土颗粒分布

Fig. 1 Grain-size distribution curves of Lanzhou loess

1.2 试验方法

共振柱试验采用英国 GDS 公司生产的固定-自由型 Stokoe 共振柱仪(图 2), 它能够测量 0.0001%~0.1% 剪应变范围内土的剪切模量和阻尼比, 主要由控制系统、驱动系统、采集系统和压力室组成。共振柱试验是通过电磁驱动系统对试样施加扭转激振, 测量得到试样共振频率 f 及对应的剪应变 γ , 剪切模量 G 则由下式计算:

$$G = \rho \left(\frac{2\pi f H}{\beta} \right)^2, \quad (1)$$

式中, ρ 为试样密度, f 为共振频率, H 为试样高度, β 为扭转振动频率方程的特征值。



图 2 共振柱试验仪

Fig. 2 Resonance column apparatus

首先将制备好的试样装于共振柱试验仪中, 然后施加围压对试样进行排水固结, 固结稳定标准为轴向变形小于 0.001 mm/min, 待试样固结稳定后进行共振柱试验。为考察围压对原状黄土小应变剪切模量的影响, 施加围压分别为 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 kPa。扭转共振试验的剪应

变随着激励电压的增加而增加，在某一激励电压下测量并记录试样的剪应变 γ 和共振频率 f ，然后再逐级增加激励电压，得到一系列剪应变 γ 和相应的共振频率 f ，最后通过式 (1) 计算得到剪切模量 G ，试验中激励电压范围为 0.0001~1 V。

2 试验结果

2.1 含水率和围压对原状黄土剪切模量衰减模式的影响

图 3 为不同含水率原状黄土在各级围压下的 $G-\gamma$ 衰减曲线，不同含水率试样的剪切模量随剪应变增加都呈现非线性衰减的变化模式。随着剪应变增加，剪切模量先近线性缓慢减小然后逐渐转变为快速衰减，剪切模量衰减速率的突变出现在剪应变 $\gamma=0.01\%$ 左右，并且围压越小，含水率越高，试样剪切模量快速衰减时的剪应变越小。围压和含水率对 $G-\gamma$ 衰减曲线形状有一定影响，对剪切模量大小的影响更加显著。对于相同含水率试样，剪切模量随着围压增加而增加，即 $G-\gamma$ 衰减曲线上移；而在相同围压下，含水率增加会导致剪切模量减小。

Hardin^[14]提出双曲线模型定量描述土的剪切模量非线性衰减行为，其表达式为

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2)$$

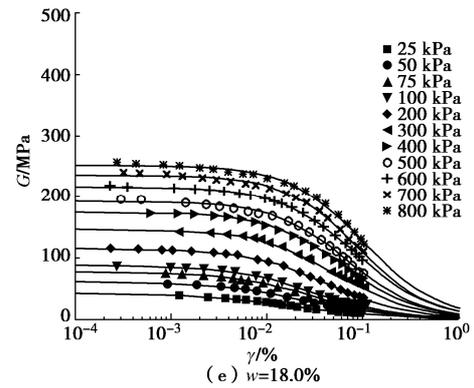
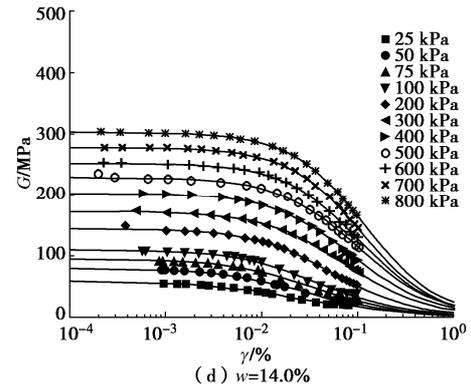
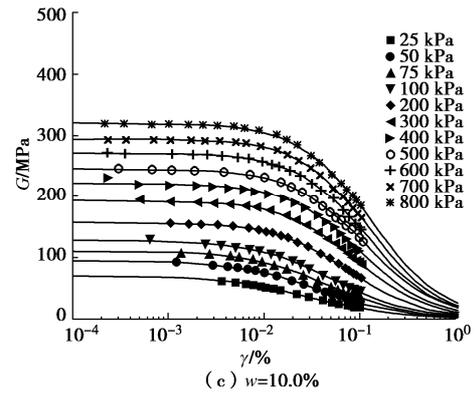
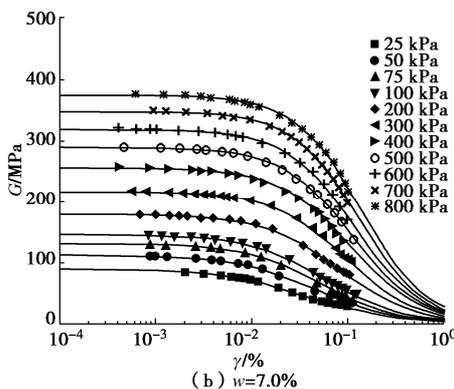
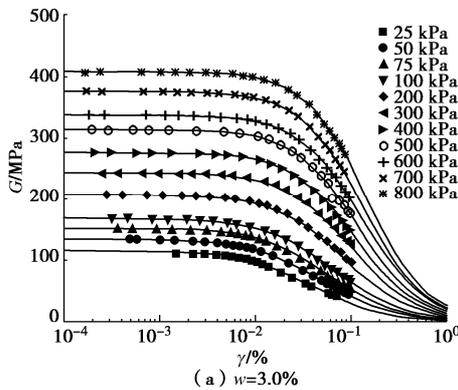


图 3 不同含水率原状黄土 $G-\gamma$ 曲线

Fig. 3 $G-\gamma$ curves of undisturbed loess with different water content

Darendeli^[15]对式 (2) 进行修正，增加了曲率系数 a ，以达到更好的拟合效果，即

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (3)$$

式中， G 为剪切模量， γ 为剪切应变， G_{\max} 为最大剪切模量， γ_r 为参考剪应变 ($G/G_{\max}=0.5$ 时的剪应变)， a 为曲率系数。

本文采用式 (3) 拟合试验结果，得到各级围压下不同含水率原状黄土的最大剪切模量 G_{\max} ，如表 2 所示。

表 2 不同围压下不同含水率原状黄土的最大剪切模量 G_{max}

Table 2 Values of maximum shear modulus G_{max} of undisturbed loess with different water contents and confining pressures (MPa)

围压 /kPa	含水率				
	3.0%	7.0%	10.0%	14.0%	18.0%
25	116.05	91.56	70.97	58.51	43.23
50	135.07	113.31	95.29	79.80	61.91
75	153.03	132.53	110.14	94.23	78.35
100	169.18	146.69	127.69	109.35	88.04
200	207.94	180.16	156.44	143.78	114.54
300	243.72	217.43	192.10	171.85	146.04
400	277.25	256.36	220.59	201.92	173.96
500	314.64	290.09	245.05	228.23	191.73
600	338.41	318.89	270.30	251.22	215.44
700	376.63	348.81	293.45	276.85	234.96
800	408.36	374.71	319.53	301.98	251.14

为更好地反映剪切模量随剪应变的变化, 采用 G_{max} 对 $G - \gamma$ 曲线进行归一化处理, 得到 $G/G_{max} - \gamma$ 曲线, 如图 4 所示。 G/G_{max} 随剪应变增长的变化趋势与 $G - \gamma$ 衰减模式一致。各围压下不同含水率原状黄土剪切模量归一化后数据点分布在一个较窄的范围内, 分布带的上限为 3% 含水率试样 800 kPa 围压下的 $G/G_{max} - \gamma$ 衰减曲线, 而下限为 18% 含水率试样 25 kPa 围压下的 $G/G_{max} - \gamma$ 衰减曲线, 这在一定程度上反映了含水率和围压对黄土动剪切模量衰减模式的影响, 即围压越低, 含水率越高, 原状黄土的剪切模量随应变增长衰减越快。

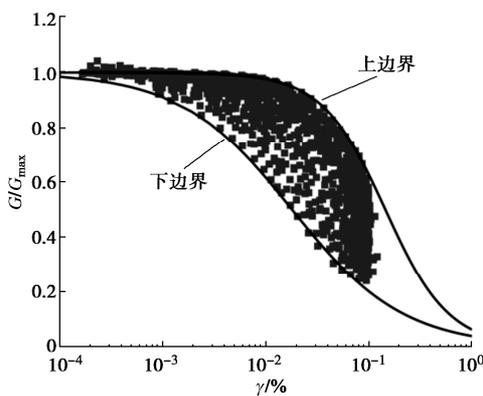


图 4 不同含水率原状黄土 $G/G_{max} - \gamma$ 曲线

Fig. 4 $G/G_{max} - \gamma$ curves of undisturbed loess with different water contents

2.2 含水率和围压对原状黄土最大剪切模量 G_{max} 的影响

最大剪切模量 G_{max} 是分析土体动力响应的重要参数^[2-3]。大量研究表明土的最大剪切模量 G_{max} 受围压, 孔隙比, 超固结比, 吸力等因素影响^[2-3, 5-13]。Hardin^[14]总结了最大剪切模量 G_{max} 与孔隙比和围压之

间关系的经验公式,

$$G_{max} = AF(e) \left(\frac{p'}{p_a} \right)^n, \quad (4)$$

式中, p' 为平均有效围压, p_a 为参考压力, 通常为大气压 (100 kPa), A, n 为拟合参数, $F(e)$ 为孔隙比函数, 通常对于细粒土^[16], $F(e) = \frac{(2.973 - e)^2}{(1 + e)}$, e 为孔隙比。

通过式 (4) 估算土的最大剪切模量 G_{max} , 主要任务是确定最佳拟合参数 A, n 。想要建立考虑含水率的原状黄土最大剪切模量估算方程, 需要首先得到不同含水率原状黄土的拟合参数 A, n , 然后建立含水率 w 与拟合参数 A, n 之间的关系, 最终得到考虑含水率的修正 Hardin 公式估算原状黄土最大剪切模量 G_{max} 。

将最大剪切模量 G_{max} 和平均有效围压 p' 分别以孔隙比函数 $F(e)$ 和参考压力 p_a 校正, 得到 $G_{max}/F(e)$ 与 p'/p_a 的关系图, 如图 5 所示。不同含水率原状黄土都呈现 $G_{max}/F(e)$ 随 p'/p_a 增大而增大但增长速率逐渐减小的变化规律。当围压相同时, $G_{max}/F(e)$ 随含水率增加而减小。不同含水率原状黄土式 (4) 的最佳拟合结果如表 3 所示, 可以看出, 随着含水率增加, 拟合参数 A 减小, 拟合参数 n 增大。绘制拟合参数 A, n 与含水率 w 之间的关系, 并采用幂函数拟合, 结果如图 6 所示, 其相关性良好, 表达式为

$$A = 129.094(100w)^{-0.364}, \quad (5)$$

$$n = 0.301(100w)^{0.060}. \quad (6)$$

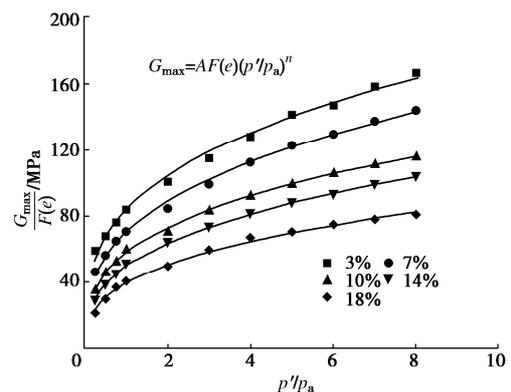


图 5 不同含水率原状黄土 $G_{max}/F(e)$ 与 p'/p_a 的关系

Fig. 5 Relationship between $G_{max}/F(e)$ and p'/p_a of undisturbed loess with different water contents

综合式 (4) ~ (6), 便可建立考虑含水率的修正 Hardin 公式, 以估算原状黄土最大剪切模量 G_{max} , 即

$$G_{max} = 129.094(100w)^{-0.364} F(e) \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0.301(100w)^{0.060}}. \quad (7)$$

表3 不同含水率原状黄土拟合结果

Table 3 Fitting results of undisturbed loess with different water contents

含水率/%	拟合结果		
	A/MPa	n	R ²
3	83.65	0.322	0.9935
7	70.10	0.343	0.9962
10	57.71	0.338	0.9983
14	49.40	0.357	0.9992
18	39.25	0.358	0.9941

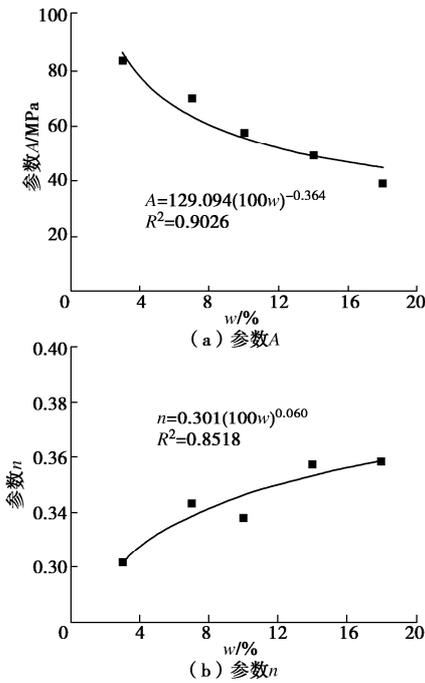


图6 拟合参数随含水率变化规律

Fig. 6 Variation of fitting parameters with water content

采用式(7)估算最大剪切模量并绘制 G_{max} 测量值与预测值之间的关系图, 如图7所示。

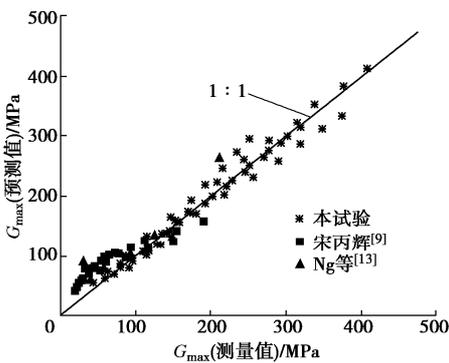


图7 最大剪切模量 G_{max} 测量值与预测值的比较

Fig. 7 Comparison between measured and predicted values of maximum shear modulus G_{max}

从图7可以看出, 所有数据点集中分布于1:1线两侧, 说明该经验公式具有较好的预测效果。还提取一些文献中可用数据采用该预测模型进行估算并与其最大剪切模量 G_{max} 测量值进行比较, 同样具有较好

的效果。

3 结论

本文通过一系列不同含水率原状黄土的共振柱试验, 研究了含水率和围压对原状黄土剪切模量的影响, 得到2点结论。

(1) 含水率和围压对原状黄土剪切模量及其衰减模式有显著影响。对于同一含水率试样, 剪切模量随着围压增大而增大; 其他条件相同时, 含水率增大, 剪切模量减小。剪切模量随剪应变增长呈非线性衰减, 并且围压越小, 含水率越大, 衰减越快。

(2) 原状黄土的最大剪切模量 G_{max} 随着围压增大而增大, 随含水率增大而减小。采用Hardin公式拟合不同含水率原状黄土最大剪切模量 G_{max} 与围压 p' 之间的关系, 得到含水率 w 与拟合参数 A, n 之间的关系, 建立考虑含水率的原状黄土最大剪切模量预测方程, 并比较本次试验及文献中的 G_{max} 测量值与预测值, 表明该方程预测效果较好。

参考文献:

- [1] 王峻, 王强, 杨宝平, 等. 基于含水率变化的黄土地震陷评价预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2155 - 2160. (WANG Jun, WANG Qian, YANG Bao-ping, et al. Seismic subsidence predication of loess site based on changes of water content[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (10): 2155 - 2160. (in Chinese))
- [2] 徐洁, 赵文博, 陈永辉, 等. 非饱和黄土初始剪切模量与孔径分布试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊 1): 227 - 231. (XU Jie, ZHAO Wen-bo, CHEN Yong-hui et al. Experimental study on initial shear modulus and pore-size distribution of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 227 - 231. (in Chinese))
- [3] WANG F T, LI D Q, DU W Q, et al. Bender element measurement for small-strain shear modulus of compacted loess[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(5): 04021063.
- [4] 蔡国庆, 张策, 黄哲文, 等. 含水率对砂质 Q3 黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 32 - 36. (CAI Guo-qing, ZHANG Ce, HUANG Zhe-wen, et al. Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 32 - 36. (in Chinese))

- [5] 李甜果, 孔令伟, 舒荣军. 不同含水率膨胀土动剪切模量特征与原位 $G-\gamma$ 衰减曲线确定方法[J]. 振动与冲击, 2021, **40**(23): 91 - 99. (LI Tian-guo, KONG Ling-wei, SHU Rong-jun. Dynamic shear modulus characteristics of expansive soil with different moisture contents and determination method of in situ $G-\gamma$ decay curve[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, **40**(23): 91 - 99. (in Chinese))
- [6] 刘炳恒, 孔令伟, 舒荣军, 等. 原生各向异性影响下湛江黏土小应变剪切模量特征[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 19 - 22. (LIU Bing-heng, KONG Ling-wei, SHU Rong-jun, et al. Characteristics of small-strain shear modulus of Zhanjiang clay under influence of inherent anisotropy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 19 - 22. (in Chinese))
- [7] 李小梅, 王芳, 韩林, 等. 珊瑚砂最大剪切模量和阻尼比的共振柱试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 1): 60 - 64. (LI Xiao-mei, WANG Fang, HAN Lin, et al. Resonant column tests on maximum shear modulus and damping ratio of coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 60 - 64. (in Chinese))
- [8] 安亮, 邓津, 郑志华, 等. 固原重塑黄土动力特性共振柱试验研究[J]. 地震工程学报, 2019, **41**(4): 949 - 956. (AN Liang, DENG Jin, ZHENG Zhi-hua, et al. Resonance column tests on the dynamic characteristics of remolded loess in Guyuan[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, **41**(4): 949 - 956. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] SONG B H, TSINARIS A, ANASTASIADIS A, et al. Small-strain stiffness and damping of Lanzhou loess[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **95**: 96 - 105.
- [11] 黄志全, 李磊, 贾景超, 等. 非饱和黄土动剪切模量和阻尼比共振柱试验研究[J]. 人民长江, 2015, **46**(5): 69 - 72. (HUANG Zhi-quan, LI Lei, JIA Jing-chao, et al. Study of resonant column experiment of dynamic shear module and damping ratio of unsaturated loess[J]. Yangtze River, 2015, **46**(5): 69 - 72. (in Chinese))
- [12] LIU X, ZHANG N, LAN H X. Effects of sand and water contents on the small-strain shear modulus of loess[J]. Engineering Geology, 2019, **260**: 105202.
- [13] NG C W W, BAGHBANREZVAN S, SADEGHI H, et al. Effect of specimen preparation techniques on dynamic properties of unsaturated fine-grained soil at high suctions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**(9): 1310 - 1319.
- [14] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, **98**(7): 667 - 692.
- [15] DARENDELI M B. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves[D]. Texas: The University of Texas at Austin, 2001.
- [16] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, **94**(2): 353 - 369.

(编校: 胡海霞)

(上接 159 页)

- [7] 张秀成, 王义重, 傅旭东. 不同应力路径下某高速公路路基黏性土湿化变形试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(6): 1791 - 1796. (ZHANG Xiu-cheng, WANG Yi-zhong, FU Xu-dong. Experimental research on wetting deformation of clayey soil of a freeway subgrade with different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1791 - 1796. (in Chinese))
- [8] 刘新宇, 张先伟, 孔令伟, 等. 冲击荷载作用下花岗岩残积土的动力损伤与破坏机理[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(10): 1872 - 1881. (LIU Xin-yu, ZHANG Xian-wei, KONG
- Ling-wei, et al. Structural damage and dynamic failure mechanism of granite residual soils under impact loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(10): 1872 - 1881. (in Chinese))
- [9] 安然, 黎澄生, 孔令伟, 等. 花岗岩残积土原位力学特性的钻探扰动与卸荷滞时效应[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 109 - 116. (AN Ran, LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, et al. Effects of drilling disturbance and unloading lag on in situ mechanical characteristics of granite residual soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 109 - 116. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)