

DOI: 10.11779/CJGE202001019

循环扭剪作用下黄土的动剪切特性试验研究

邵 帅¹, 邵生俊^{1, 2}, 陈 攀¹, 袁 浩¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 原状黄土具有显著的结构性, 在增湿及循环剪切作用下均可导致其结构破坏。通过不同固结围压条件下大尺寸原状黄土圆筒试样的动扭剪试验, 测试分析了原状黄土从小应变到大应变的动应力应变关系, 动剪切模量和阻尼比的变化规律, 以及逐级增大循环扭剪作用下黄土的剪切强度。得到了 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 剪切应变范围内黄土动剪切模量随固结围压和含水率的变化规律, 分析了黄土最大动剪切模量随黄土构度的变化规律。建立了黄土最大动剪切模量与构度和固结围压的关系式。揭示不同固结围压条件下不同含水率黄土的阻尼比随动剪应变对数值的变化分布在一个带内; 循环扭转作用下圆筒黄土样存在两组破坏面。

关键词: 原状黄土; 动扭剪试验; 动应力应变关系; 动剪切模量; 阻尼比; 剪切破坏面

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2020)01 - 0168 - 07

作者简介: 邵 帅(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事黄土力学与土动力学研究。E-mail: 315602024@qq.com。

Experimental study on dynamic shear characteristics of loess under cyclic torsional shearing

SHAO Shuai¹, SHAO Sheng-jun^{1, 2}, CHEN Pan¹, YUAN Hao¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The unsaturated intact loess has remarkable structured properties. Its structure is damaged by wetting and cyclic shear action, which leads to the development of shear and subsidence deformation of loess under earthquake. Based on the dynamic torsional shear tests on hollow cylindrical specimens of intact loess under different consolidation pressures, the dynamic shear-strain relationship from small to large strain, the dynamic shear modulus and the dynamic damping ratio of loess are tested and analyzed. The relationships between dynamic shear stress and shear strain, dynamic shear modulus and dynamic damping ratio and the failure strength of loess under gradually increasing cyclic torsion shear action are measured. The variation rules of dynamic shear modulus of loess under different consolidation pressures and moisture contents are obtained in the shear strain range of $10^{-5} \sim 10^{-2}$. It is shown that the maximum dynamic shear modulus increases with the initial structural index of loess. An approximate linear relationship among the maximum dynamic shear modulus, the structural index and the consolidation pressure is established. The damping ratio of loess changing with the dynamic shear strain logarithm under different consolidation pressure and moisture contents is released. The shear failure characteristics of cylindrical loess samples under cyclic torsional shear action are constituted by two groups of shear failure planes.

Key words: undisturbed loess; dynamic torsional shear test; dynamic stress-strain relationship; dynamic shear modulus; damping ratio; shear failure plane

0 引 言

中国黄土地区大多分布在高烈度地区。由于黄土欠压密结构的动力易损性, 地震作用常引发滑坡、震陷、地裂等灾害, 给人民的生产和生活带来了巨大损失^[1-3]。历史上, 该地区历次强震 ($M_s \geq 8$, 6次; $M_s \geq 7$, 22次; $M_s \geq 6$, 52次) 都曾引起严重的地震灾害^[1-2]。近年来, 1995年甘肃永登 5.8级地震和 2013年岷县—漳县 6.6级地震也产生了黄土震陷和滑坡灾

害。当地震作用下黄土结构遭到不同程度破坏时, 黄土的大孔隙、弱胶结结构首先崩塌; 此后, 随着累积循环剪切作用发展, 最终导致黄土动力剪切破坏。

土的动扭剪试验是一种测试分析土动力学特性的有效方法。该试验能够在空心圆柱试样上施加竖向和

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11572245)

收稿日期: 2018 - 10 - 06

*通信作者: (E-mail: sjshao@xaut.edu.cn)

水平向循环振动和扭剪荷载, 模拟主应力轴旋转剪切作用, 测试土的动应力应变随循环次数变化的规律。潘华等研究了 6 种主应力轴旋转应力路径的动力学特性^[4]。沈扬等^[5]分析了恒定围压下主应力轴旋转应力路径。Yoshimine 等^[6]研究了不排水条件下饱和砂土的主应力轴方向和中主应力的效应。Sivathayalan 等^[7]研究了初始应力状态和主应力轴旋转对饱和砂土不排水性状的影响。Zdravkovic 等^[8]研究了固结过程主应力轴旋转引起的各向异性特性。杨利国等^[9]通过圆筒试样动扭剪试验研究了原状黄土的动力特性。王志杰等^[10]、骆亚生等^[11]研究了黄土的动模量和阻尼比变化规律。可见, 人们已经深入开展了土的动力特性的动扭剪试验研究。

为了揭示主应力轴旋转动力剪切作用下黄土的力学特性, 本文采用空心圆柱压扭振动试验仪对西安原状黄土进行了不同含水率, 不同固结围压的动扭剪试验研究。

1 土样基本物性及试验方法

1.1 土样的物理性质指标与制备

试验土样在西安月登阁一场地采取, 取土深度 3~8 m, 属于 Q₃ 黄土。该黄土的基本物理性质指标见表 1。现场原位采取原状黄土, 室内切削、钻孔一切铣制备空心圆筒试样如图 1 所示。

表 1 黄土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of loess samples

天然密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
1.68	21.0	1.39	34.2	18.6	15.6



图 1 原状黄土圆筒状试样

Fig. 1 Cylindrical sample of loess

1.2 试样的应力状态

圆筒试样动扭剪试验的原理是先通过对圆筒试样施加轴向荷载 W 、扭矩 T 以及内腔压力 p_i 、外腔压力

p_o 静荷载; 再施加循环轴向振动和扭转荷载, 测试动应力、动应变及动孔压等力学响应。扭矩 T 产生扭剪应力 $\sigma_{z\theta}$; 内、外腔压力产生径向正应力 σ_r 和环向正应力 σ_θ ; 轴力及内、外腔压力产生轴向正应力 σ_z 。试样的内、外腔压力是由水通过橡皮膜施加在试样内、外壁上, 故内、外壁面上无剪应力, σ_r 为主应力, 且 $\sigma_r = \sigma_\theta$ 。圆筒试样上单元体的轴向正应力、径向正应力、环向正应力和剪应力状态如图 2 所示。根据轴向和环向平面内的应力条件即可求得大、小主应力。

假定试样为弹塑性材料, 给出轴向正应力 σ_z 、径向正应力 σ_r 、环向正应力 σ_θ 和扭剪应力的平均值的表达式:

$$\sigma_z = (W + \pi(p_o r_o^2 - p_i r_i^2) - A_s p_o) / A_s, \quad (1)$$

$$\sigma_r = (p_o r_o + p_i r_i) / (r_o + r_i), \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = (p_o r_o - p_i r_i) / (r_o - r_i), \quad (3)$$

$$\sigma_{z\theta} = \frac{1}{2} \left[\frac{3T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} + \frac{T}{\pi(r_o^2 + r_i^2)(r_o - r_i)} \right], \quad (4)$$

式中, A_s 为试样截面面积, r_i , r_o 分别为试样内、外半径。

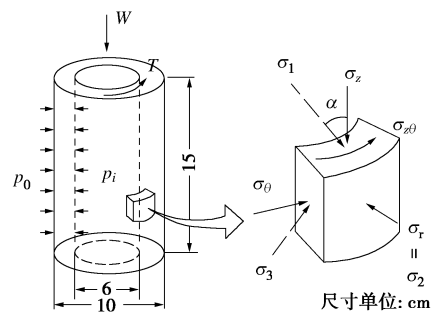


图 2 圆筒试样扭转加载和应力条件

Fig. 2 Loading and stress conditions of specimen in dynamic hollow cylinder torsion test

1.3 静动荷载及试验方法

(1) 固结

原状黄土圆筒试样通过风干—保湿, 或者滴水—保湿, 在保湿缸内再通过水膜转移达到水分均匀的方法而制备试样的含水率 w 。制备试样含水率分别为 12%, 16%, 20% 和 24%。沿试样轴向和内外壁分别施加均等固结压力, 分别为 50, 100, 200, 300 kPa, 待固结变形稳定后开始施加动剪应力。

(2) 动扭转剪切

动扭转剪切试验时, 逐级施加谐振动扭剪应力, 每一级应力循环振动 10 次。每级循环振动后, 再在初始静应力条件下固结, 变形趋于稳定后施加下一级谐振动扭剪应力, 直到试样剪切破坏为止。图 3 即为黄土试样均等固结应力 200 kPa 条件下逐级施加循环振动脉动扭剪应力的时程曲线。

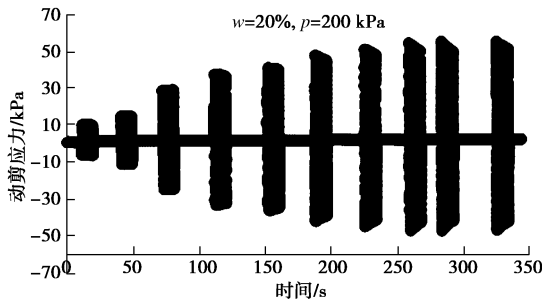


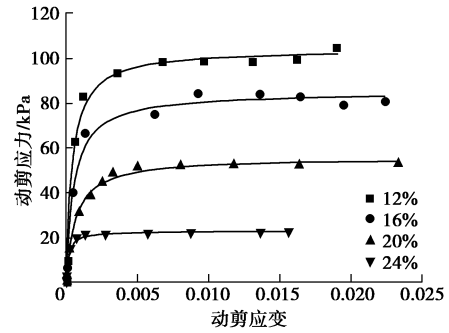
图3 逐级加荷时程曲线
Fig. 3 Time-history curves of step-loading

2 黄土的动应力应变特性

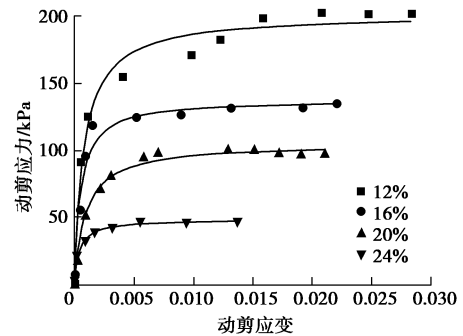
2.1 黄土的动应力应变骨干曲线

在动荷作用下，土的动本构关系常用动应力应变骨干曲线和滞回曲线来表示。动应力应变骨干曲线的非线性与滞回曲线的黏滞性是主要的动力特性。

依据逐级增大动应力幅值的循环动扭剪试验，可测试得到每级循环动扭剪作用下黄土的动应力和动应变的时程变化曲线。分析每级循环动扭剪作用过程中第3振次的动剪应力和动剪应变，可得到随着动剪应变发展的骨干曲线如图4、5所示。显然，不同试验条件下的骨干曲线均近似呈双曲线，可用双曲线函数描述。同一固结应力条件下，随着含水率的增加，动剪应力应变曲线的渐近值逐渐减小，且初始切线斜率亦逐渐减小。同一含水率条件下，随着固结围压的增大，动剪应力应变曲线的渐近值逐渐增大。这表明当试样施加的固结压力增大，尽管土结构遭到压缩屈服破坏，但压缩应力作用下原状黄土的微裂隙闭，压硬性仍然使土的刚度增大。



(c) 固结围压200 kPa



(d) 固结围压300 kPa

图4 不同含水率的动剪应力应变曲线

Fig. 4 Dynamic shear stress-strain curves under different moisture contents

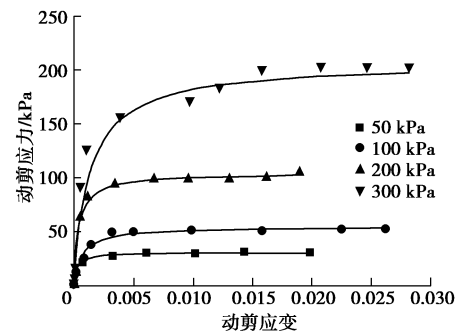


图5 不同固结围压黄土的动剪应力应变曲线 (含水率12%)

Fig. 5 dynamic shear stress-strain curves under different consolidation confining pressures at moisture content of 12%

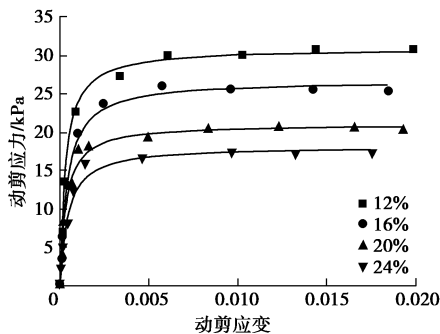
2.2 黄土的动剪切模量变化规律

(1) 含水率、固结围压对黄土的动剪切模量的影响

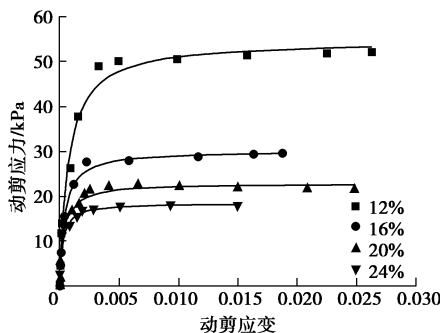
依据不同含水率、固结围压条件下黄土的骨干曲线，黄土的动剪应力与动剪应变可以用 Hardin-Drnevich 的双曲线模型描述^[8-11]。动剪应力应变骨干曲线每个点的割线斜率称为动剪切模量，即

$$\frac{1}{G_d} = \frac{\gamma_d}{\tau_d} = \frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_{dmax}} \quad (5)$$

式中， G_0 为初始动剪切模量或最大动剪切模量， τ_{dmax} 为最大动剪应力。依据骨干曲线，可得图6所示结果，表明骨干曲线符合式(5)所述的关系。



(a) 固结围压50 kPa



(b) 固结围压100 kPa

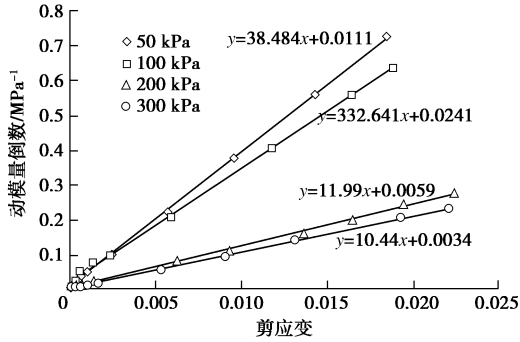


图 6 黄土的动模量倒数与动剪应变关系 (含水率 16%)
 Fig. 6 Relationship between dynamic modulus reciprocal and dynamic shear strain of loess (moisture content of 16%)

同一固结围压和含水率条件下, 黄土的动剪切模量变化规律如图 7, 8 所示。图 7 表明, 在不同固结围压下, 相同含水率黄土的动剪切模量均随动应变的增大而单调减小, 且最大动剪切模量随含水率的增大而显著减小。图 8 表明, 一定固结围压下相同含水率黄土的动剪切模量均随动应变的增大而单调减小, 且最大动剪切模量随固结围压的增大而增大。

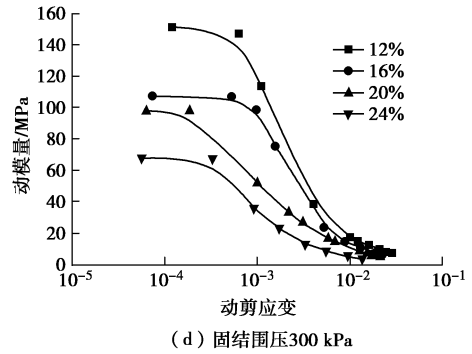


图 7 不同含水率黄土的动剪切模量 - 动剪应变曲线
 Fig. 7 Dynamic shear modulus-dynamic shear strain relationship curves under different moisture contents

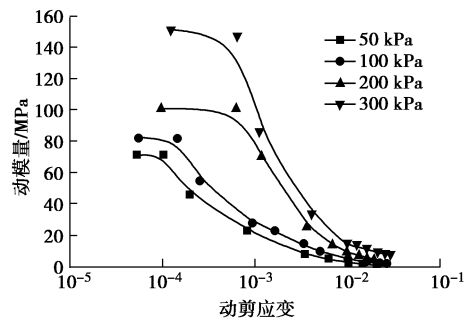
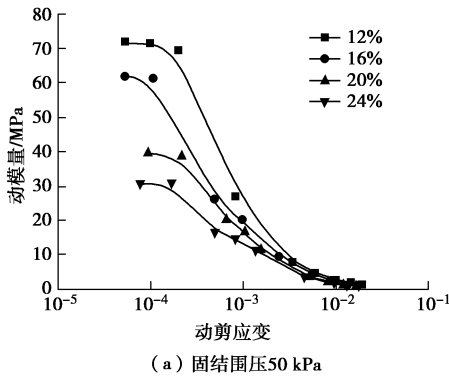
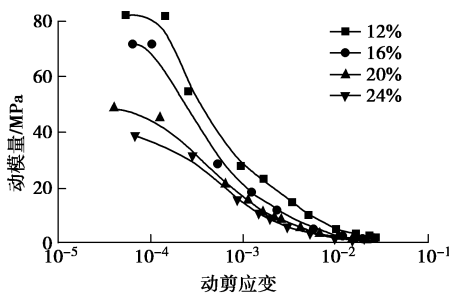


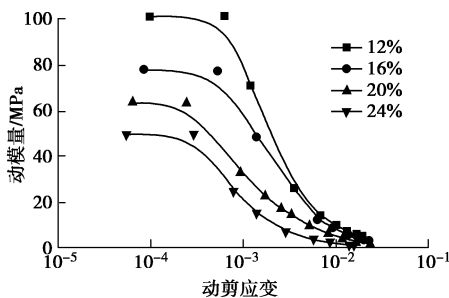
图 8 不同围压黄土的动剪切模量 - 剪应变曲线 (含水率 12%)
 Fig. 8 Dynamic shear modulus-shear strain curves of loess under different consolidation pressures (moisture content 12%)



(a) 固结围压 50 kPa



(b) 固结围压 100 kPa



(c) 固结围压 200 kPa

由此可知, 随着含水率的增加, 土粒间的水膜增厚, 粒间联结作用减弱, 使得土骨架抵抗动剪切作用的能力下降, 表现为土的动剪切模量减小, 动剪切变形增大, 动抗剪强度减小。同时, 土粒的水膜增厚, 改变了土结构的排列和联结, 使得土易产生变形。小应变条件下土的动剪切模量随含水率的增大而显著减小, 表明水分引起土结构性衰减明显。

同一固结围压条件下, 低含水率黄土的最大动剪切模量较高含水率黄土的最大动剪切模量显著增大, 且随着剪应变的增大, 动剪切模量显著减小, 表明低含水量黄土结构随剪应变增大显著地遭到破坏。与低含水率黄土相比, 高含水率黄土随着剪应变增大的减小趋缓; 低、高含水率黄土的动剪切模量的差异随动剪应变增大逐渐减小, 表明土结构遭到动剪切变形发展累积破坏后, 弱化了水分对土结构性的影响。由于含水率增大引起土结构性逐渐丧失, 在较小动剪切作用下土即产生较大变形。动剪应变较大时, 不同含水率黄土的动剪切模量逐渐趋于一致。

不同固结围压作用下, 黄土同一动剪应变的动剪切模量差异明显; 固结围压越大, 土的最大动剪切模量越大。然而, 固结围压在 50~100 kPa, 最大动剪切模量的变化较小; 固结围压达到 200~300 kPa 时, 最

大动剪切模量明显增大。这表明固结围压较小时，黄土原生结构未遭到压缩屈服破坏，土的压硬性较弱，最大动剪切模量主要受原生结构的影响。固结围压较大时，黄土原生结构已遭到压缩屈服破坏，土的压硬性较强，动剪切模量增大。

(2) 最大动剪切模量与构度之间的关系

不同含水率黄土的结构性不同，可以用构度定量分析^[12]。黄土构度与综合物理特征参数之间的关系式为

$$m_u = 10.7e^{\beta Z} + 1 \quad (6)$$

$$Z = (w - w_p) \rho_d G_s / [\rho_w (G_s + e)] \quad (7)$$

式中， Z 为综合物理特征参数， β 约等于0.1， w 为含水率， w_p 为塑限同， ρ_d 为干密度， ρ_w 为水的密度， G_s 为土粒比重， e 为土的孔隙比。

不同固结围压作用下黄土的压硬性和压损性不同，结构性黄土的最大动剪切模量也不同。根据不同含水率黄土在不同固结围压作用下的最大动剪切模量，可得最大动剪切模量与构度和固结围压之间的关系。

图9表明，同一固结围压作用下黄土的最大动剪切模量随构度的增大而增大；同一构度黄土的最大动剪切模量随固结围压的增大而增大。固结围压50~100 kPa时，最大动剪切模量值随构度的增加幅度较小，200~300 kPa，最大动剪切模量值随构度的增加幅度大。由此可知，当固结压力达到或超过200 kPa时，相同构度黄土的压硬性使其最大动剪切模量随固结围压的增大而增强。

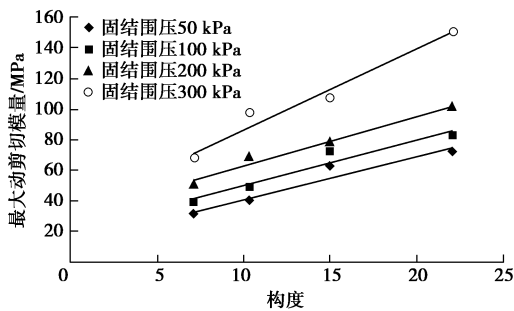


图9 最大动剪切模量随构度的变化

Fig. 9 Variation of maximum dynamic shear modulus with structural index

根据土的压硬性和结构性，原状黄土的最大动剪切模量随构度和固结围压的变化可表述为

$$G_{max} = KA(m_u) p_a (\sigma_{3c} / p_a)^n \quad (8)$$

式中， G_{max} 为最大动剪切模量， K ， n 为土性参数， p_a 为标准大气压， σ_{3c} 为固结围压。由固结围压100 kPa条件下最大动剪切模量随构度的线性变化可得

$$A(m_u) = 3m_u + 19.3 \quad (9)$$

依据不同含水率黄土不同固结围压条件的最大动剪切模量，绘制 $\lg(G_{max} / A(m_u) / p_a)$ 与 $\lg(\sigma_{3c} / p_a)$ 的关系曲线，如图10所示。式(8)可以表述为

$$G_{max} = 10A(m_u) p_a (\sigma_{3c} / p_a)^{1/2} \quad (10)$$

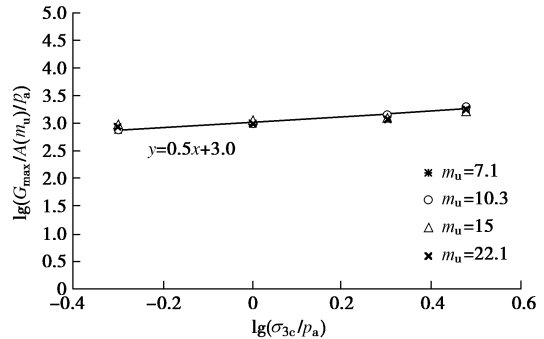


图10 最大动剪切模量与固结围压和构度的关系

Fig. 10 Variation of maximum dynamic shear modulus with consolidation confining pressure and structural index

2.3 黄土的阻尼比变化规律

土的滞回曲线反映了土的黏滞阻尼特性。一周应力应变滞回圈面积反映了振动循环一振次土的能量损失，滞回圈越小，土的阻尼比越小；滞回圈越大，土的阻尼比越大。含水率20%黄土在固结围压200 kPa下振动循环滞回曲线如下图11所示，随着剪应变幅增大，土的滞回圈越大。

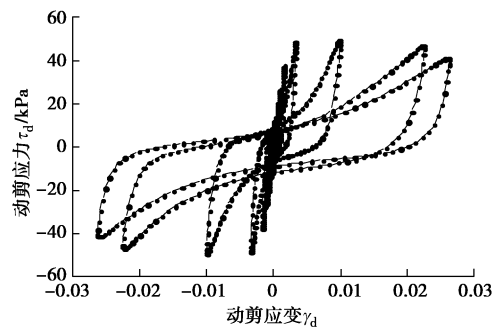


图11 w=12%，围压100 kPa 应力应变滞回圈形态图

Fig. 11 Stress-strain hysteresis loop patterns

不同含水率黄土阻尼比随应变幅值的变化规律如图12所示。由图12可知，不同固结围压条件下，不同含水率黄土的阻尼比均随动剪应变的增大而增大。这表明随着动剪应变的增加，土骨架被剪切破坏的累积发展增大，土在循环剪切中的黏滞性和摩擦性的耗能增大，阻尼比增大；随着含水率的增大，土骨架循环剪切变形的塑性耗能也增大，阻尼比增大。

3 黄土的循环扭剪强度与破坏模式

在逐级增大的循环扭剪作用下，试样扭剪破坏的动剪应力与固结应力之间的关系如图13所示。随着固结压力增大，黄土的动强度近似呈线性增大趋势；随

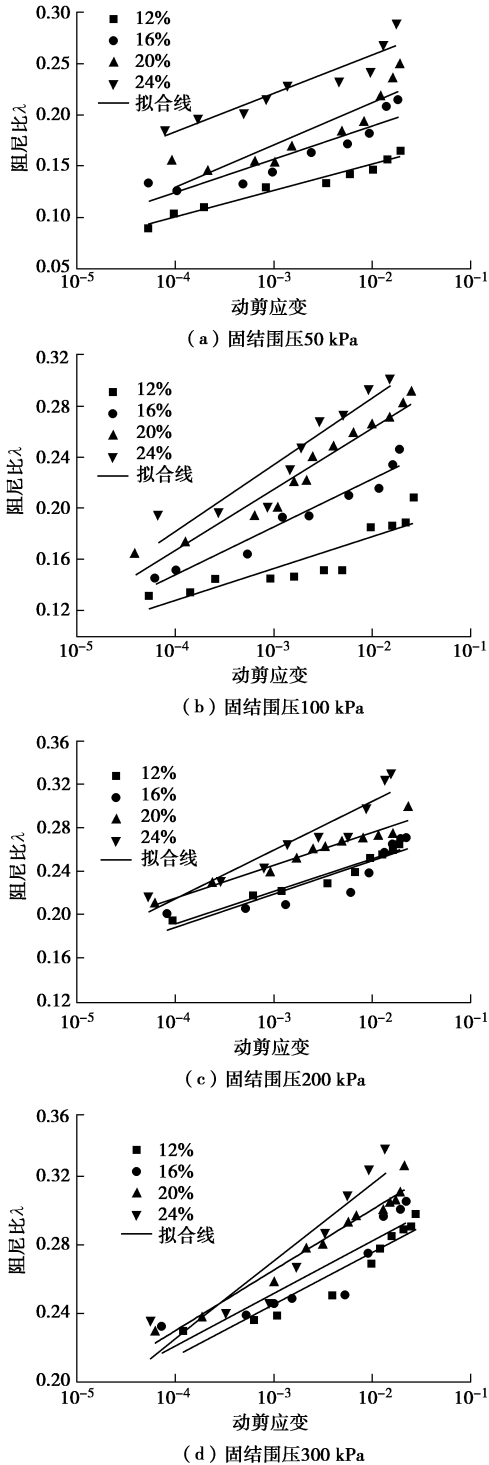


图 12 不同含水率的黄土阻尼比变化规律

Fig. 12 Variation laws of damping ratio of loess with different moisture contents

随着含水率增大, 黄土的动强度逐渐减小。在循环扭剪变形累积发展过程中, 不同含水率黄土圆筒土体产生了两组贯通的动剪切破坏面, 如图 14 所示。一组剪切破坏面与另一组剪切的破坏面相交, 构成了两组滑移面。土体的剪切变形主要由两组滑移剪切面相对剪切变形构成; 两组破坏面之间的单元保持了土的原有结构。黄土的竖向裂隙影响循环扭转剪切作用下破坏面

的分布特征: 竖向裂隙和一组剪切破坏面可能构成相对变形的剪切面, 引起土体的剪切破坏。

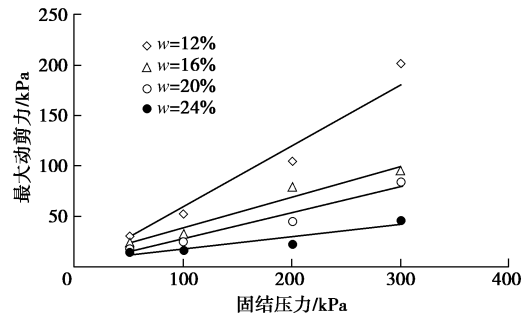


图 13 黄土的循环扭剪强度

Fig. 13 Cyclic torsional shear strengths of loess

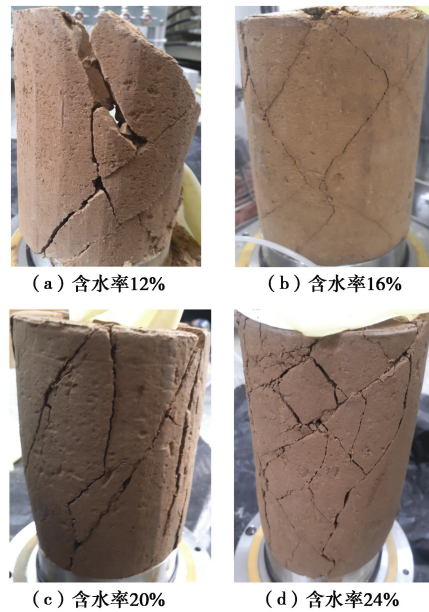


图 14 圆筒土体扭剪破坏模式

Fig. 14 Torsional shear failure modes of cylindrical soils

4 结 论

通过西安原状黄土大尺寸圆筒试样均压固结循环扭剪试验, 测试分析了不同含水率黄土的骨干曲线, 动剪切模量和动阻尼比随动剪应变的变化规律, 循环扭剪动强度及黄土循环剪切破坏模式。得出以下 4 点结论。

- (1) 在动剪应变 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 范围内, 黄土动剪应力剪应变骨干曲线符合双曲线。
- (2) 通过分析不同固结围压条件下不同含水率黄土的动剪切模量随动剪应变的变化规律, 建立了最大动剪切模量与构度和固结围压之间的关系式。
- (3) 不同含水率黄土的阻尼比随动剪应变的变化介于 0.1~0.33 内。相同固结围压条件下, 黄土的阻尼比随剪应变的增大而增大, 随含水率的增大而增大。
- (4) 循环扭剪作用下, 圆筒黄土体存在两组滑移

剪切破坏面, 两组滑移面之间的土结构保持不变。

参考文献:

- [1] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999. (ZHANG Zhen-zhong. Earthquake Disaster Prediction of Loess[M]. Beijing: earthquake Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min. Loess Dynamics[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2003. (in Chinese))
- [3] 陈永明, 石玉成. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J]. 地震研究, 2006, **29**(3): 276 - 280. (CHEN Yong-ming, SHI Yu-cheng. Basic characteristics of earthquake landslide in the Loess region of Northwest China[J]. Journal of Seismological Research, 2006, **29**(3): 276 - 280. (in Chinese))
- [4] 潘 华, 陈国兴. 动态围压下空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1701 - 1712. (PAN Hua, CHEN Guo-xing. Analysis of capabilities of HCA to simulate stress paths for principal stress rotation under dynamic confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1701 - 1712. (in Chinese))
- [5] 沈 扬, 周 健, 龚晓南. 空心圆柱仪(HCA)模拟恒定围压下主应力轴循环旋转应力路径能力分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 281 - 287. (SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Analysis on ability of HCA to imitate cyclic principal stress rotation under constant confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 281 - 287. (in Chinese))
- [6] YOSHIMINE M, ISHIHARA K, VARGAS W. Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(3): 179 - 188.
- [7] SIVATHAYALAN S, VAID Y P. Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**: 63 - 76.
- [8] ZDRAVKOVIC L, JARDINE R J. The effect on anisotropy of rotating the principal stress axes during consolidation[J]. Geotechnique, 2001, **51**(1): 69 - 83.
- [9] 杨利国. 复杂初始应力条件下压实黄土动力特性的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. (YANG Li-guo. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Compacted Loess under Complex Initial Stress[D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2010. (in Chinese))
- [10] 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, **28**(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, **28**(9): 1464 - 1469. (in Chinese))
- [11] 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, **36**(7): 830 - 834. (LUO Ya-sheng, TIAN Kan-liang. Dynamic shear modulus and damping ratio of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **36**(7): 830 - 834. (in Chinese))
- [12] 邵生俊, 王丽琴, 邵 帅, 等. 黄土的结构屈服及湿陷变形的分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(8): 1357 - 1365. (SHAO Sheng-jun, WANG Li-qin, SHAO Shuai, et al. Structural yield and collapse deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(8): 1357 - 1365. (in Chinese))