

动扭剪荷载作用下兰州黄土动力特性试验研究

杨永俊^{1,2}, 骆亚生², 高群¹

(1. 深圳市南华岩土工程有限公司, 广东 深圳 518020; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 根据初始含水率 W_0 的不同, 把兰州原状黄土分为干型黄土、湿型黄土和饱和黄土。采用动扭剪仪对这 3 种类型黄土分别进行了研究, 主要研究了兰州黄土的动应力应变本构关系、阻尼比变化特性和动强度特性并给出了相应振次 N 为 10、20 和 30 次时的动强度指标值。研究结果表明, 3 种类型黄土的应力应变曲线呈双曲线型; 阻尼比 λ 与动剪应变对数 $\lg(\gamma_d)$ 具有线性相关性; 动强度受固结应力的影响各不相同并且动强度指标随振次的增大而减小, 但内摩擦角减小的趋势相比黏聚力要小。

关键词: 黄土; 动扭剪试验; 动力特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0107-04

中图分类号: TU444

Dynamic Properties of Lanzhou Loess under Dynamic Torsional Shear

YANG Yong-jun^{1,2}, LUO Ya-sheng², GAO Qun¹

(1. Nanhua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518020, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Lanzhou loess is divided into dry patten, wet patten, and saturated patten according to original water content. The three patterns are studied by using torsion shear apparatus. The constitutive relationship between dynamic stress and strain, the dynamic properties of the damping ration, and the strength of the three patters are studied. The dynamic strength indexes are presented for the cycle time of 10, 20, and 30. The study indicates that the curve for stress and strain of the three patterns is a hyperbolic curve; the relationship between damping ration and dynamic strain is linear; and dynamic strength is affected by consolidation stress. At the same time, the dynamic strength indexes change with the cycle time, but change in friction angle is less than that in cohesive strength.

Keywords: loess; dynamic torsional test; dynamic property

历史上黄土地区在地震作用下产生的滑坡、震陷和地裂曾经给当地人民的生命和财产造成巨大损失, 使得人们不得不重视和关注动荷载作用下黄土地区工程问题^[1-6]。研究土动力特性的试验一般多在常规动三轴上进行的, 由于黄土适应变形的能力较差, 在常规动三轴试验中容易出现试样变形局部化以及试样与振动轴脱离的现象, 使试样的轴向变形量难以精确测量, 给试验数据采集带来误差, 从而给试验后期数据的整理和分析带来难度^[5]。本研究在动扭剪三轴仪上对兰州黄土在不同湿度条件下进行动扭剪试验, 可避免常规动三轴仪振动过程中的固有缺陷, 以期更好地分析总结兰州黄土的动力特性。

1 试验方案及方法

1.1 试验方案

试验土样取自兰州某大学城, 取土深度为 3~ 5

m, 属于 Q_3 黄土, 比重 2.71, 烘干法测定其天然含水率 4.8%, 天然孔隙比为 1.007, 天然干密度 1.36 g/cm^3 , 天然饱和度 13.05%。

原状黄土按起始含水率 (W_0) 不同, 根据缩限 (W_s) 和液限 (W_l) 划分为干型黄土 ($W_0 < W_s$) 湿型黄土 ($W_s < W_0 < W_l$) 和饱和黄土 ($W_0 > W_l$)^[8]。为了分析总结 3 种类型黄土动力特性异同, 拟定试样初始含水率 W_0 为: 5%, 19%, 37.16% (饱和含水率)。具体试验方案见表 1。

1.2 试验方法

试验在日本诚研社生产的 DTC-199 型电液伺服加荷往复扭转动三轴仪上进行。试验过程中试样的各个静压力、动扭矩、动孔隙水压力、动转角及轴向变形可由电脑数据采集处理系统记录。将原状黄土土样按要求削制、钻孔, 制成标准试样数个, 分别用风

干法和水膜转移法(配水法)对试样进行含水率控制,然后将不同含水率的试样用保鲜膜包裹,放入密闭养

护缸进行养护,待内部水分分布均匀后备用。试样为空心圆柱形,外径 70 mm,内径 30 mm,高 100 mm。

表 1 兰州原状黄土动扭剪试验方案

试样类型	干密度 $\rho_d /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	固结比 K_c	试验项目	控制含水率	$\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$		
				$W_0 / \%$			
兰州原状黄土	1.36	1.5	模量、阻尼比试验	5	✓	✓	✓
				19	✓	✓	✓
				37.16(饱和)	✓	✓	✓
			动强度试验	12	✓	✓	✓
				19	✓	✓	✓
				37.16(饱和)	✓	✓	✓

对于动应力应变、阻尼比试验,当土样在偏压固结(固结比 $K_c = 1.5$,围压 $\sigma_3 = 100, 200, 300 \text{ kPa}$)变形稳定后,在不排水条件下,采用逐级加荷试验的方法,逐级施加固定振次(10次)的动荷载,使试样破坏。试验过程中由电脑自动采集动应力和动应变,依据不同动力对应的动应变整理试验结果。

对于强度试验,其固结条件与动应力应变、阻尼比试验相同。当土样固结稳定后,即对其施加预先确定好的动应力(一般认为振次在 5~100 次时土样就达到选定的破坏标准所施加的动应力较好),当土样达到选定的破坏标准时记下此时的振次。然后依据破坏振次和相应的动应力作出动强度曲线图。由于在动荷载作用过程中,非饱和黄土试样的孔隙水压力基本不变或略有上升,孔隙气压力也上升缓慢,而饱和黄土试样的孔隙水压力则相对上升较快,因此,无法采用孔隙压力破坏标准。同样由于施加的动荷载为水平动剪应力,试验过程中,动剪应变的增大和动剪应力的减小都是逐渐变化的,没有明显的突变。所以,也不能采用屈服破坏标准,否则人为因素太大,增加动强度测定的不确定性。本研究中兰州黄土的动扭剪试验动强度测定采用单级加荷的方法,即一个试样按所预定的动剪应力扭剪直到破坏,避免了多级加荷中试样状态变化对试验结果产生的误差。动强度试验破坏标准采用轴向应变的 5%,即轴向应变达到 5% 时认为试验试样就破坏了。取加载频率 $f = 1 \text{ Hz}$,试验动荷载按等幅正弦波形式施加。

2 试验结果及分析

2.1 动应力应变关系

综合分析发现这 3 种类型黄土的动应力应变曲线为双曲线,并且满足公式:

$$\tau_d = \frac{y_d}{a + b y_d} \quad (1)$$

式中: τ_d, y_d —— 为由动扭剪试验所测得的动应力、动

应变值。

公式(1)也可以表示成:

$$\frac{y_d}{\tau_d} = a + b y_d \quad (2)$$

公式(2)表示一条直线,直线的截距 $a = 1/G_0$ (G_0 表示最大动剪切模量),斜率 $b = \frac{1}{\tau_{dmax}}$ 。

将干型黄土、湿型黄土和饱和黄土动应力应变曲线化为(2)式直线形式,对于 3 种类型黄土不同条件下的 a, b 值见表 2。

进一步分析得出,干型黄土和湿型黄土动剪应力随动剪应变的增长而增大,呈硬化型,同一种土随着围压的增大这种硬化程度向越来越强的趋势发展;而饱和黄土在高围压下(300 kPa),动剪应力随动剪应变曲线呈弱硬化型,而在低围压下(200 kPa),在振动初期表现出应力随应变增长,但到了振动后期,应力应变曲线下降,整个曲线呈弱软化型。这是由于天然状态的干型黄土和湿型黄土常处于欠压密状态,在高固结围压下,原状黄土的结构遭到破坏,土被压密,表现为压硬性,随着动应变幅的增大,需要作用的动应力幅值也在增大。

而饱和黄土在围压低于 200 kPa 时,原状黄土被压密作用不明显,在振动初期,土体结构发挥着作用,应力应变曲线呈上升趋势;在振动后期,随着一定振次动荷载的累积振动作用,土的结构逐渐破坏,较大幅值的动应力作用下表现为变形的迅速发展,动应力减小,在低固结围压下原状黄土结构的损伤破坏,导致土的结构性衰减,动应力应变曲线表现为软化的特征。

另外,干型黄土和湿型黄土动应变在 0~1% 范围内时,从动应力应变曲线可以看出,在相同应变条件下,动应力受固结围压的影响,如干型黄土当围压从 100 kPa 变化到 200 kPa 动应力的变化 $\Delta \tau_d(200 \sim 100)$,与围压从 200 kPa 变化到 300 kPa 动应力的变化 $\Delta \tau_d(300 \sim 200)$ 之比 $\eta = \frac{\Delta \tau_d(200 \sim 100)}{\Delta \tau_d(300 \sim 200)}$ 约为 2,而湿型黄土

约为 3; 饱和黄土动应变在 0~ 0.2% 范围内 η 值与另外两种类型黄土的相似, 之后随着动应变的增加 η 越

来越大。另外, 从表 2 中斜率 b 值的变化量上也能说明固结应力对动应力的影响程度。

表 2 3 种类型黄土 a, b 取值

黄土类型	$\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$		$\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$		$\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$	
	$a/10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$	$b/10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$	$a/10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$	$b/10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$	$a/10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$	$b/10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$
干型黄土	16	8	12	5.0	8	4.0
湿型黄土	37	14	20	8.0	17	5.4
饱和黄土	15	61	12	14.7	7	14.0

2.2 动阻尼比特性

土的阻尼比反映土在周期性动荷载作用下, 动应力—应变关系滞回圈表现出的滞后性。它是由土体变形时内摩擦作用消耗能量造成的, 反映动荷载作用下能量因土的内部阻力而损失的性质, 是土动力特性的一个重要性质。土在周期性动荷载作用下的变形包括弹性变形和塑性变形两部分, 动应力较低时显示弹性, 随着动应力的增加塑性变形逐渐发展, 动应力—应变关系显示出非线性和应变的滞后性特点^[8-9]。

向应变达到 5% 时就认为试验试样破坏了。

根据试验结果整理出土样破坏时动剪应力 τ_d 与破坏振次关系 n_f 关系曲线, $\tau_d - \lg n_f$ 关系曲线亦称为土的动强度曲线, 反映了土在不同动荷载作用次数下达到破坏所需的动应力的。由于干型黄土与湿型黄土动强度曲线相似, 下面将只给出兰州湿型黄土和饱和黄土动强度曲线如图 2—3, 及相应破坏振次 $N = 10, 20, 30$ 次时的强度指标 c_d, φ_d 值。

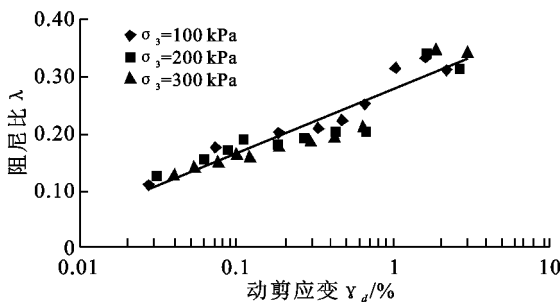


图 1 干型黄土不同固结压力下 $\lambda - \lg(\gamma_d)$ 关系散点

图 1 是由动扭剪仪试验结果整理得到的兰州原状黄土阻尼比与动剪应变对数关系的散点图。测试结果表明, 3 种类型原状黄土的阻尼比与动剪应变对数关系比较离散, 但阻尼比总体上随动剪应变的增大呈波动上升趋势, 且这种上升趋势都可以由半对数坐标中的直线方程拟合得到如下关系式:

干型黄土:

$$\lambda = 0.0485 \lg(\gamma_d) + 0.278 \quad (3)$$

湿型黄土:

$$\lambda = 0.0202 \lg(\gamma_d) + 0.273 \quad (4)$$

饱和黄土:

$$\lambda = 0.0406 \lg(\gamma_d) + 0.3181 \quad (5)$$

2.3 兰州黄土动强度特性

土的动强度通常被定义为在一定次数动荷载作用下产生某一指定破坏应变所需要的动应力^[9]。动强度试验中的破坏标准有孔压标准、应变标准和屈服标准^[10]。本试验破坏标准采用轴向应变的 5%, 即轴

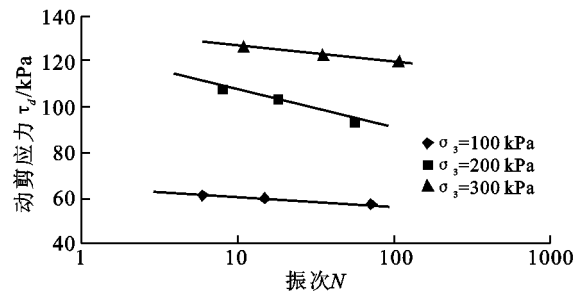


图 2 干型、湿型黄土 $\tau_d - \lg n_f$ 关系曲线

分析动强度试验结果可以得出, 3 种类型的原状黄土, 在试样状态和固结应力比相同时, 黄土的动强度随固结应力的增加而增大, 强度曲线随固结应力的增大越来越高。具体分析可得, 干型黄土和湿型黄土, 随着固结应力的增加动强度增加的趋势逐渐变小。这主要是因为这两种类型的黄土存在天然结构强度, 这种天然结构强度能够承担一定的动应力, 随着固结应力的增加天然结构强度逐渐被破坏并趋于土的稳态强度; 而对于饱和黄土, 由于天然黄土的多孔性、欠压密性导致了对水的特殊性表现为黄土遇水湿陷, 饱和黄土在水的作用下破坏了黄土在形成过程中的天然结构强度, 所以随着固结应力的增加强度的变化几乎是均等的(图 2)。同时这也能从动剪应力比 $\tau_d/\sigma_3 - \lg n_f$ 曲线图 4—5 上得以验证, 从图 4 可以看出同一固结应力比条件下干型黄土和湿型黄土 $\tau_d/\sigma_3 - \lg n_f$ 关系曲线没有归一性, 表明强度是受初始应力状态影响的。而图 5 饱和黄土 $\tau_d/\sigma_3 - \lg n_f$ 关系曲线却具有归一性, 表明动强度受初始应力状态的影响要小一些或几乎不受初始应力状态的影响。

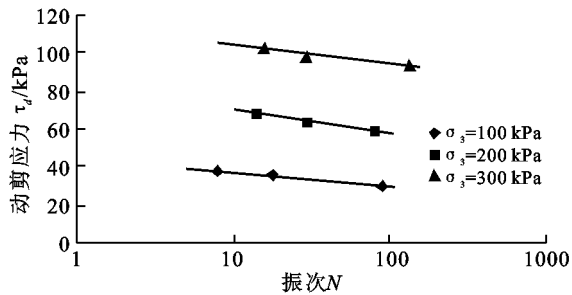


图 3 饱和黄土 $\tau_d - \lg n_f$ 关系曲线

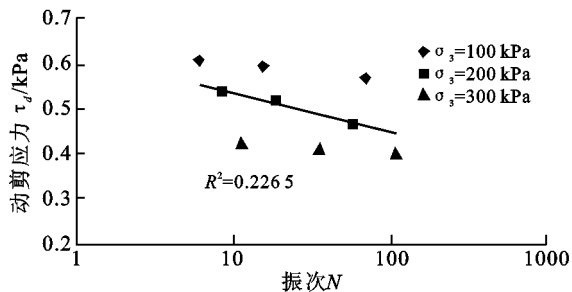


图 4 干型、湿型黄土 $\tau_d / \sigma_3 - \lg n_f$ 关系曲线

次、20 次、30 次摩尔圆及其强度包线得到 3 种类型黄土的动强度指标(表 3)。

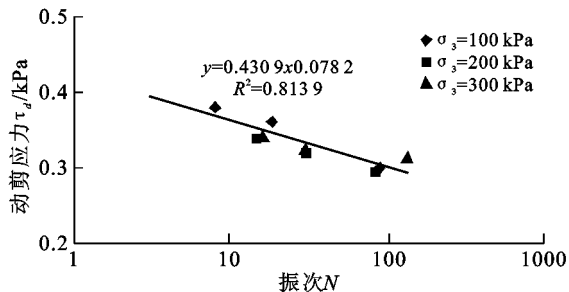


图 5 饱和黄土 $\tau_d / \sigma_3 - \lg n_f$ 关系曲线

从表 3 可以看出，动强度指标中黏聚力 c_d 和内摩擦角 φ_d 随振次的增大都呈减小趋势，但黏聚减小的幅度要比内摩擦角的大，这是由于黄土有明显的结构强度，结构强度的大小直接影响着动强度，结构强度的损伤程度取决于动应力的作用和作用振次，只有在较大的动应力作用下黄土结构强度才会在较小振次时发生较大损伤达到破坏，因此，破坏振次越小动强度就越大。

2.4 动强度指标

根据动强度曲线图 2- 3 绘制破坏振次 $N = 10$

表 3 各类型兰州黄土动强度指标

类别	固结比 K_c	含水率 $W / \%$	$N = 10$		$N = 20$		$N = 30$	
			c_d / kPa	$\varphi_d / (^\circ)$	c_d / kPa	$\varphi_d / (^\circ)$	c_d / kPa	$\varphi_d / (^\circ)$
干型黄土		5	36	26.0	33	25.0	27.5	24.0
湿型黄土	1.5	19	25	23.5	23	23.0	20.0	22.5
饱和黄土		37.16(饱和)	20	21.0	18	20.5	15.5	20.0

3 结论

依据初始含水率 W_0 的不通把兰州黄土分为干型黄土、湿型黄土和饱和黄土并采用动扭剪三轴仪对各自动力特性进行了研究。研究发现三种类型黄土的应力应变曲线呈双曲线型，进一步分析发现，对于同一种土而言，相同应变况下随着固结应力的增大动应力的增大呈减缓趋势；固结应力对兰州黄土动应力应变曲线的影响是不同的，其中动应力受围压的影响程度依次为干型黄土 < 湿型黄土 < 饱和黄土；兰州黄土阻尼比 $\lambda - \lg(\dot{\epsilon}_d)$ 具有线性相关性；兰州黄土动强度受固结应力的影响各不相同并且动强度指标随振次的增大而减小，但内摩擦角减小的趋势相比黏聚力要小。

[参 考 文 献]

[1] 巫志辉, 谢定义, 方彦, 等. 洛川黄土动变形强度特性的研究[J]. 水利学报, 1994(12): 67-71.

[2] 骆亚生, 谢定义. 黄土破坏动应力和初始动模量的一种经验估算公式[J]. 西北水资源与水工程, 2000, 11(3): 6-10.

[3] 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.

[4] 王兰民, 袁中夏, 王峻, 等. 强夯处理后黄土地基的动力特性与地震性能[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2840-2847.

[5] 李作勤. 扭转三轴试验综述[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 80-93.

[6] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003: 10.

[7] 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.

[8] 孙静, 袁晓铭. 土的动模量和阻尼比研究述评[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 88-95.

[9] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

[10] 王杰贤. 动力地基与基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001.