

黄土层下覆强风化岩动弹性模量和阻尼比试验研究

王平^{1,2,3}, 王杰民⁴, 刘红玫^{1,2,3}, 王谦^{1,2,3}

- (1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局黄土地震工程开放实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:运用扭剪仪对小应变 ϵ_d 时黄土层下覆强风化岩的动模量和阻尼比进行了系列研究, 分析了其动力学特性。结果表明, 在小应变情况下风化岩体的动应力与动应变关系为非线性弹性关系, 基本符合双曲线型模型; 在相同应变范围内, 泥岩阻尼比大于红砂岩的阻尼比; 在相同固结条件下, 红砂岩的初始动弹模大于泥岩初始动弹模。研究为厚覆盖层黄土场地及其下覆强风化岩层、隧道、高边坡动力反应分析和地震后土体变形机理研究提供了必要试验技术和参数。

关键词: 强风化岩; 动力学特性; 动弹性模量; 阻尼比

中图分类号: TU458⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)03-0291-04

Experimental Study on Dynamic Elasticity Modulus and Damping Ratio of Highly Weathered Rock which Covered by Loess

WANG Ping^{1,2,3}, WANG Jie-ming⁴, LIU Hong-mei^{1,2,3}, WANG Qian^{1,2,3}

- (1 Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;
2 Open Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China;
3. Geotechnical disaster prevention engineering technology Research Center of Gansu Province, CEA, Lanzhou 730000, China;
4 College of resources and environmental Science Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A series of studies on dynamic elasticity modulus and damping ratio of highly weathered rock which covered by loess are conducted with small strain ϵ_d , using triaxial shear equipment and their dynamics properties are analyzed. The results show that the dynamic stress and strain relation of highly weathered rock is nonlinear elastic relations, and fit the model of hyperbolic type with small strain ϵ_d . Within the same strain range, the mudstone's damping ratio is greater than the red sandstone's. In the same consolidation condition, the initial elastic modulus of red sandstone is greater than the one of mudstone. The research provides experimental technology and dynamic property parameters to dynamic response analysis and seismic deformation mechanism study for highly weathered rock which covered by thick layer of loess.

Key words: Highly weathered rock; Dynamic property; Dynamic elasticity modulus; Damping ratio

0 引言

近年来随着经济的快速发展和西部大开发战略的全面实施, 基础建设带来了大量的复杂的岩土工程问题, 特别是地基土在动载荷作用下的稳定和变

形问题。动三轴试验是以试件斜面上 45° 应力模拟现场土的应力状态, 对地基土动力学问题的研究来说是最有效的方法之一。

收稿日期: 2011-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(50978239); 中国地震局基本科研业务经费(2010A65); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2011009

作者简介: 王平(1977-), 男(汉族), 助理研究员, 主要从事土力学及岩土工程室内试验方面的研究。

在实际的工程中,风化岩、黄土状粘土是黄土地区比较常见的土类。本文对黄土层下覆强风化岩动模量和阻尼比试验研究旨在加强对深层大应力状态下黄土试样和黄土层下覆强风化岩层开展动三轴试验研究;同时通过此项研究积累泥岩、强风化岩动三轴试验方法^[1]。

1 试样的采集与制备

试验试样的来源之一为甘肃省境内的泥岩或者风化岩,通过地质勘探钻井取样。来源之二为兰州市皋兰山老滑坡上的风化岩体(红砂岩)。

泥岩试样成样是通过钻孔取上岩样,在车床采用低进给量,低转速加工的方法车为圆柱状。对于红砂岩,岩样是从岩石块上通过 $\Phi 50$ mm 模具直接钻取后分段。

黄土下覆强风化岩主要物理性能指标如表 1 所示。

表 1 黄土下覆强风化岩主要物理性能指标

试样名称	取样深度/m	天然密度/ $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	含水率/%	试样规格/mm	
				Φ	L
泥岩	11.2~11.4	2.125	1	51.5	89
红砂岩	18	2.31~2.35	10.3~11.2	49~49.5	89.5~90.5

2 试验方案

进行了各种围压条件下动模量动力特性试验或者不同地点试样的动模量和阻尼比实验研究。固结条件依据规范选取^[2-3],泥岩采用不饱和固结不排水试验,侧压力系数数据规范选 0.33, $\sigma_1 = 300$ kPa, $\sigma_3 = 100$ kPa;红砂岩选用无侧限条件, $\sigma_1 = 1$ MPa。

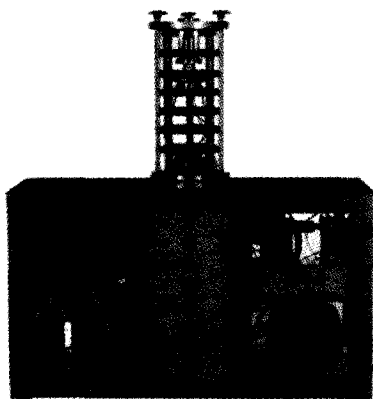


图 1 HCA (WF12440) 试验仪

Fig. 1 HCA (WF12440) triaxial equipment.

试验仪器为 WF1440 扭剪仪。试验仪器主要技术参数:荷载采用气动作动器施加,压力室及反压

均通过气转水系统施加;竖向作动器行程 50 mm;实心试样尺寸:50 mm×100 mm 和 100 mm×200 mm(直径×高度);最大竖向荷载 ± 10 kN,最小可测载荷载 1 N;应变测量可达 10^{-5} (0.001%);外室压力测量可达 1 MPa,精度 0.1 kPa;孔隙水压力测量可达 1 MPa,精度 0.1 kPa;反压测量可达 1 MPa,精度 0.1 kPa;试样体积变化测量可达 100 cc,精度 0.1 cc。

本研究所用试样采集、制样难度较大,同时受到仪器性能、试样含水率等的影响,在重复多次试验的基础上进行了多个围压条件下的红砂岩和泥岩动模量和阻尼比动力特性试验,最终选定无侧限的试验方法,并得到较好的试验结果。

3 试验结果分析

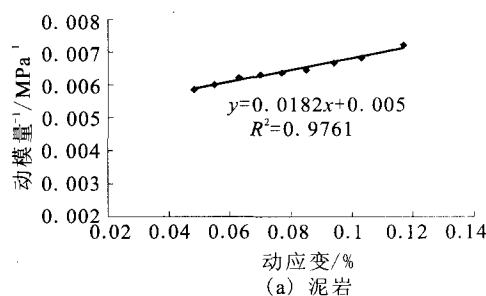
如图 2 所示,在循环荷载作用下,泥岩、红砂岩动应力 σ_d 与动应变 ϵ_d 比值和 ϵ_d 的关系基本呈直线关系线表征,其直线方程如式(1)所示。采用最小二乘法拟合直线,得泥岩试验结果相关系数 $R^2 = 0.9761$, $a = 0.005$ MPa⁻¹;红砂岩试验相关系数 $R^2 = 0.9607$, $a = 0.0026$ MPa⁻¹。

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

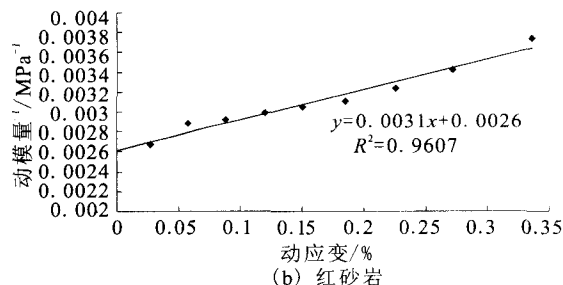
式中 σ_d 为轴向动应力; ϵ_d 为轴向动应力方向动应变; a, b 为试验常数。

由式(1)得

$$\sigma_d / \epsilon_d = 1 / (a + b \epsilon_d) = E_d \quad (2)$$



(a) 泥岩



(b) 红砂岩

图 2 动模量倒数与动应变拟合曲线

Fig. 2 Dynamic strain-elasticity modulus reciprocal bit curves.

即试验过程中土样的动应力—动应变关系表现为非线性双曲线形式。采用 R·L·Kondner 双曲线关系表示为式(2),动应力与动应变的关系如图3所示,动模量与动应变的关系如图4所示。

由式(2)可知,当 ϵ_d 趋向于 0 时,

$$E_d = E_{\max} = 1/a \quad (3)$$

由式(3)得,测试泥岩试样的初始动弹性模量 $E_{\max} = E_0 = 200$ MPa,红砂岩试样的初始动弹性模量 $E_{\max} = E_0 = 385$ MPa。

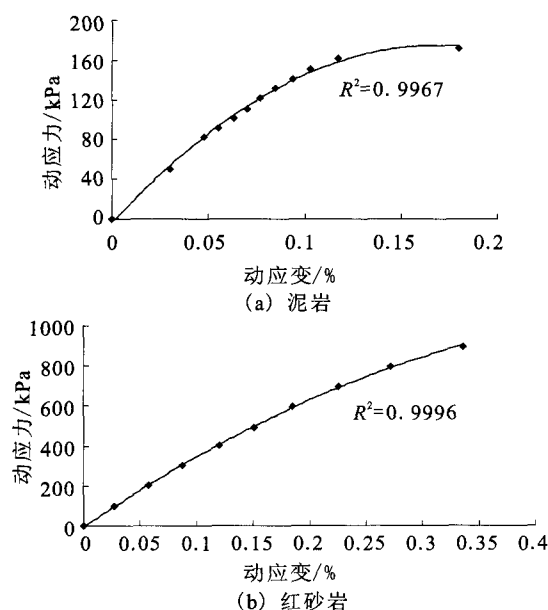


图3 动应力与动应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curves.

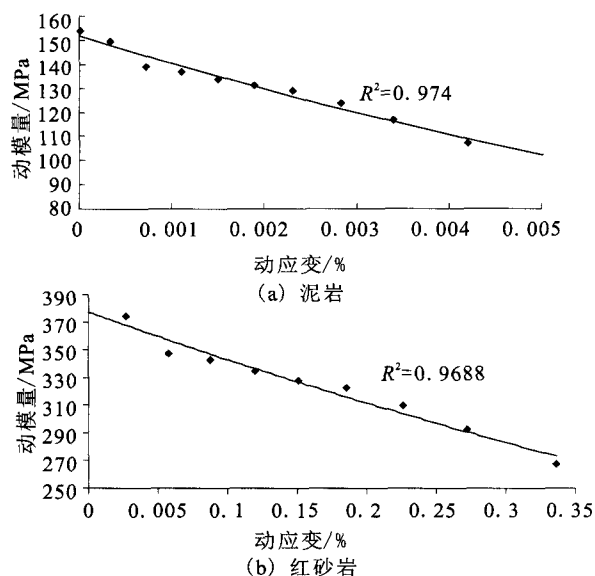


图4 动模量与动应变曲线

Fig. 4 Dynamic strain-elasticity modulus curves.

由图2、图3、图4可知,随着载荷增加,变形增大,动弹性模量呈现急速下降的趋势。

阻尼比是循环载荷能量在土体内耗损的规律,是动力特性指标之一。由于泥岩和红砂岩在循环载荷作用下的变形包含弹性和塑性变形,随着载荷增加,动应力和动应变关系具有非线性和滞后性的特点。按照阻尼比的定义,采用积分的方法对试验过程记录的结果进行计算。对于泥岩当施加动应力增加,动应变 ϵ 变化范围约为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$,阻尼比 λ 的范围为 0.011~0.2;对于红砂岩而言,动应变变化范围约为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$,阻尼比的范围为 0.01~0.1,计算结果与动应变的关系较离散(图5)。

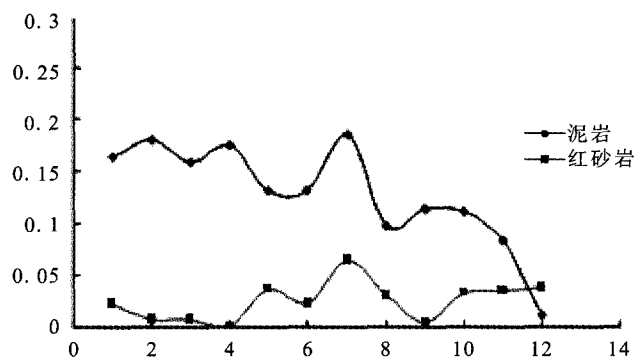


图5 阻尼比发展曲线

Fig. 5 Damping ratio development curves.

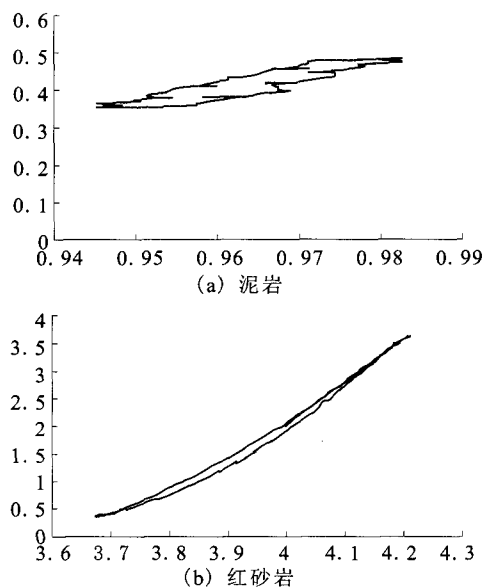


图6 滞回圈

Fig. 6 Hysteresis loops.

图6为某一循环内(非相同条件)动应力与动应变的关系(滞回圈)。由图可知红砂岩、泥岩的应力与动应变关系具有滞后性和非线性;同时泥岩的滞回圈较宽,红砂岩的滞回圈较泥岩的窄,表明泥岩具

有“土”的特性,较软,而红砂岩具有“岩”的特性,较硬。同时说明了红砂岩具有较高的初始动弹性模量,在相同外荷载作用条件下,泥岩更易受到扰动破坏。

图7为试验所得的剪模比与剪应变关系曲线。试验得到的泥岩和红砂岩的剪模比在0.7~0.9的范围内,即剪应变的范围在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间,这是由于仪器的性能和试样的物理性质的限制,应变无法达到 10^{-2} 的,在图上表现为在0.7~0.9的区间数据点丰富,其他段较少。为了保证曲线的完整性,通过式(4)、式(5)反演增加了数据:

$$G = E_d / 2(1 + \mu) \quad (4)$$

$$\gamma = \epsilon_d (1 + \mu) \quad (5)$$

式中 G 为剪切模量; E_d 为动弹性模量; γ 为剪切应变; ϵ_d 动应变; μ 为泊松比(根据波速测试取得,此处计算参考资料取0.25)。

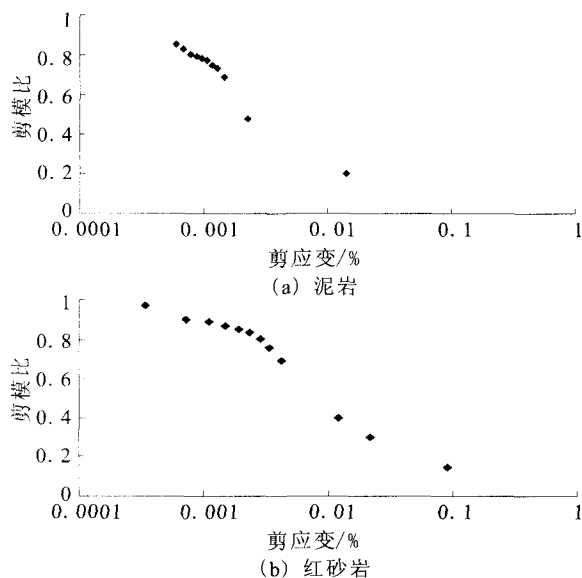


图7 剪模比与剪应变关系曲线

Fig. 7 Shearing modulus ratio-shear strain curves.

4 结论

通过风化岩在动荷载条件下的三轴试验,可得到如下结论:

(1) 在小应变 ϵ_d 情况下,风化岩体的动应力与动应变关系为明显的非线性弹性关系,基本符合双曲线型模型。

(2) 本研究中,动模量的衰减急剧与材料过硬有关。在相同的应变范围内,泥岩的阻尼比大于红砂岩的阻尼比,这从动力学角度反映了泥岩在能量吸收过程中更易吸收能量,即在相同的载荷作用之下,泥岩更容易产生变形,具有较高的易损性。

(3) 在相同固结条件下,红砂岩的初始动弹模大于泥岩初始动弹模。这与试验材质关系密切。研究所得初始动弹性模量与固结条件有关,随着固结压力的增大,初始动弹模也逐渐增大。

〔参考文献〕

- [1] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [2] 中华人民共和国水利部. SL-237-1999 土工试验规程[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [3] 中国机械工业部. GB/T50269 地基动力特性测试规范[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [4] 崔文鉴,孙远茹. 陕西东坡地区原状黄土动剪模量及阻尼比的试验研究[J]. 西北地震学报,1990,12(4):60-68.
- [5] 张振中,段汝文. 工程地震研究报告. 西安黄土动力特性试验结果及其评价[R]. 中国地震局兰州地震研究所工程地震报告及集,1985.