

循环荷载作用下广西红黏土动力特性试验研究^①

穆 坤, 郭爱国, 柏 巍, 孙志亮, 臧 濛

(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实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要:针对广西上林县原状红黏土开展一系列循环加载动三轴试验,分析天然含水率、围压与固结应力比等对红黏土动力特性,包括动应力-动应变关系、动弹性模量以及阻尼比等的影响来研究循环荷载作用下红黏土的动力特性。试验结果表明:广西原状红黏土动应力-动应变关系曲线接近双曲线;由于初始剪应力的影响,达到相同的动应变,在均压固结下所需的动应力比在偏压固结下所需动应力要小;动弹性模量随着动应变的增加而减小,且减小幅度随应变增加逐渐减小,初始应力状态对动弹性模量的影响最为显著;固结应力比、围压、含水率和振动次数等对阻尼比均有影响,综合反映在阻尼比随动应变增加而减小,阻尼比离散性较大,取值范围在 0.05~0.20 之间。利用 Konder 双曲线模型对试验数据进行拟合,得到相关参数,可为广西地区原状红黏土动力特性设计和数值计算提供一定的理论和参数支持。

关键词:红黏土;动弹性模量;阻尼比;土动力学;双曲线模型

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0487-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0487

Experimental Study on Dynamic Properties of Red Clay in Guangxi under Cyclic Loading

MU Kun, GUO Ai-guo, BAI Wei, SUN Zhi-liang, ZANG Meng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In order to study the dynamic properties of red clay under cyclic loading conditions, a series of cyclic triaxial tests are carried out on undisturbed red clay obtained from Shanglin county, Guangxi. The impacts of water content, confining pressure, and consolidation stress ratio on the dynamic properties of red clay such as the dynamic stress-strain relationship, dynamic elastic modulus, and damping ratio are analyzed. It is indicated from the test results that the stress-strain curve of red clay from Guangxi is close to a hyperbolic style; due to the effects of the initial shear stress, a higher dynamic stress is needed to obtain the same strain under anisotropic consolidation as under isotropic consolidation; the dynamic modulus decreases as the dynamic strain increases; the decrease in amplitude decreases with the increase of the dynamic strain; and the initial stress state has the most significant impact on the dynamic elastic modulus. The damping ratio is affected by the consolidation stress ratio, confining pressure, and water content of red clay from Guangxi, and it increases as the dynamic strain increases, with its value distributed between 0.1 and 0.2. The damping ratio data has a high discreteness. Based on the hyperbolic model by Konder, test data are fitted, and relevant parameters are obtained. This research could be a refer-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209196); 交通部西部交通建设科技项目(20113184931700)

作者简介: 穆 坤(1985-), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 博士研究生, 主要从事特殊土动力特性方面的研究. E-mail: mukun2018@163.com

ence for further design of dynamic properties and numerical calculation, and it also provides relevant parameters.

Key words: red clay; dynamic elastic modulus; damping ratio; soil dynamics; hyperbolic model

0 引言

红黏土广泛地分布在我国云、贵、川、两湖和两广地区。该类土性质独特,具有高天然含水率、高饱和度、高液限、高天然孔隙比等不良物理性质,同时具有较高的力学强度和较低压缩性,这与具有类似指标的一般黏性土的规律完全不同^[1]。且该类土普遍具有较强的收缩性、裂隙性与分布不均匀性(地层剖面呈现上硬下软)等工程地质特性,使得相关工程存有很大的工程隐患^[2]。如对此类土的特殊性质置之不理或采取工程措施不合理,则有可能对土的强度与变形特性做出错误判断,给设计方案的实施造成阻碍。

目前,对于红黏土的工程应用处置多参考膨胀土,虽然两者某些工程性质十分接近,但这种处置方法会导致红黏土有利因素(高强度、低压缩性)的应用潜能发挥不足^[3]。如广泛用于高速铁路、公路的红黏土的勘察设计中宜按特殊类土评价,虽然以往对这类土的物理-力学特性有较多研究,但缺乏对其特殊土本质机理的认识,尤其是其动力学特性。对于这一领域,国内外学者已经开展了一系列研究,如汤康民^[4]基于室内动三轴试验成果,研究了扰动红黏土在循环荷载作用下动应变随振次的变化曲线及动本构关系,提出了极限压密动应力的概念。刘晓红^[5]研究了红黏土的动本构关系、动弹模量与动强度特性,探讨了围压、固结比、含水比等因素对它们的影响规律。Fall等^[6]对塞内加尔西部地区的红黏土在循环荷载下的累积塑性应变发展规律进行了研究。然而,由于红黏土具有典型的区域地质工程特性,不同地区红黏土由于成土环境、物化组成以及结构特征的不同,其动力学的共性并不显著,各个地区红黏土的动力研究成果无法通用。另外,室内动力试验中地震波的等幅周期的短期循环荷载并不能模拟车辆行驶对土体带来的周期循环荷载影响。因此,对于红黏土的动力学行为与参数评价仍需深入研究。

鉴于此,本文针对广西高速公路路堑段的路基红黏土进行模拟交通循环荷载作用下的动三轴试验,通过动应力-动应变关系、动弹性模量、阻尼比等参数评价广西红黏土的动力特性,建立含水率、围压

和应力比 $k_c(\sigma_1/\sigma_3)$ 对其的影响关系,并寻找合理的变形预测模型,为该地区红黏土路基的设计、数值计算和施工提供技术参考。

1 试验土样与试验方案

1.1 试验土样

试验土样取自广西上林县境内在建来宾至马山高速公路桩号 DK281+200 处。取样采用探槽法,具体过程为:整平取样处表面,按照 25 cm×25 cm×25 cm 尺寸轮廓去除四周土体形成土柱,聚乙烯薄膜密封土样后蜡封,装入木箱中,土样与箱子之间空隙填充缓震材料,土样封箱运输至实验室后立即试验。依照本方法取得的试样如图 1 所示。根据公路土工试验规程^[7]对试样进行基本物理力学性质调查,结果见表 1、表 2。广西红黏土呈棕红色,根据室内试验结果可知该土富含黏粒,具有较高的天然含水率、孔隙比、液限、塑性指数和较低的渗透性,同时,土样具有明显的收缩特性和弱膨胀性,为典型高液限红黏土。



图 1 原状红黏土照片

Fig. 1 Photo of the undisturbed red clay

1.2 试验方案

试验仪器为美国进口的 LoadTrac-II/FlowTrac-II 自动循环加载三轴测试系统,该系统为应力控制式动三轴系统,采用循环加载的液压伺服控制,可保证动荷载的高精度。试验系统如图 2 所示。

为评价含水率对红黏土动力特性影响,试验试样选取含水率分别为 28.3%(天然含水率)、26.6%

(自然风干 6 h)、25.1%(自然风干 15 h)的三种原状土。制样的制备方法为:用削样器和钢丝锯将块状原状土削成尺寸 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱形,用游

标卡尺测量试样直径和高度,然后将试样放置在保湿缸中静置用以试验。

表 1 广西红黏土的基本物理力学指标

Table 1 The basic physical and mechanical indexes of red clay in Guangxi

液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_L	天然孔隙比 e	颗粒比重 G_s	天然容重 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数 K $/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	压缩模量 E_s/MPa^{-1}	线缩率 $/\%$	无荷膨胀率 $/\%$	有效黏聚力 C'/kPa	有效内摩擦角 $\varphi'/(\text{^\circ})$
73	41	32	0.92	2.71	18.1	6.83×10^{-4}	8.46	4.7	1.2	53.1	27.6

表 2 广西红黏土的粒度组成与矿物成分

Table 2 Grain size composition and mineral components of red clay in Guangxi

颗粒组成/ $\%$						矿物组成/ $\%$			
$<1\ \mu\text{m}$	$<5\ \mu\text{m}$	$<20\ \mu\text{m}$	$<50\ \mu\text{m}$	$<75\ \mu\text{m}$	$>75\ \mu\text{m}$	石英	高岭石	绿泥石	长石
32.4	42.2	59.0	75.8	85.0	15.0	7	81	5	7



图 2 自动循环加载三轴测试系统

Fig. 2 Automatic cyclic loading triaxial testing system

为考虑动应力幅值、围压以及固结应力比的影响,动三轴试验的固结应力比取 1.0、1.5;围压取 100、200、300 kPa;振动频率 1 Hz。试验时,数据采集系统自动记录每一个循环过程(本次试验每个循环采集 25 个数据点^[8])中试样的轴向位移、轴向力,计算得到试样的动应力和动应变。分析动应力-动应变关系的几何特征、动弹性模量和阻尼比等参数。其中,对于动弹性模量的计算,应在每级荷载下选择第 10~15 个循环中滞回圈具有代表性的某一循环的轴向力与轴向变形数据,进行动应力与动应变进行计算,这样可以忽略振动次数对动弹性模量的影响^[8]。

循环动应力 σ_d 计算为

$$\sigma_d = (\sigma_{dmax} - \sigma_{dmin})/2 \quad (1)$$

式中, σ_{dmax} 为最大动应力; σ_{dmin} 为最小动应力。

动应变计算为

$$\epsilon_d = (\epsilon_{dmax} - \epsilon_{dmin})/2 \quad (2)$$

式中, ϵ_{dmax} 为最大动应变; ϵ_{dmin} 为最小动应变。

则弹性模量 E_d 为

$$E_d = \sigma_d/\epsilon_d \quad (3)$$

计算阻尼比时,选择有代表性的某一循环,绘制该循环的应力-应变关系曲线即滞回曲线(图 3)。滞回曲线所围成滞回圈的面积代表能量消耗,则周期性动荷载在一次循环中消耗的能量与该循环中最大剪应变对应的势能之比即阻尼比 λ ,其计算公式为

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{A_1}{A_2} \quad (4)$$

式中, A_1 为滞回圈面积; A_2 为三角形的面积。

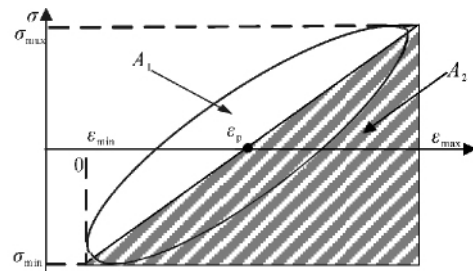


图 3 第 n 次循环应力-应变滞回曲线及阻尼比计算示意图

Fig. 3 Stress-strain hysteresis curve and calculation sketch map of the damping ratio in the nth circle

需要注意的是,试验过程中,在每一级围压下动应力逐级增大施加,但不能超过竖向应力,以免试样帽在试验过程中与试样脱离。

2 广西原状红黏土的试验结果与分析

2.1 动应力-动应变关系

广西原状红黏土的动应力-动应变关系曲线如图 4 所示。图 4(a)、(b)分别为固结应力比 K_c 为 1.0 和 1.5 时,原状红黏土在不同固结压力下的动应力-动应变曲线。从中可见,各级围压下不同固结比的土的动应力-动应变曲线具有明显的非线性,皆为硬化型曲线,即动应力随动应变的增加而增加,没有

出现动应力峰值,并且随着围压的增大,动应力-应变曲线的切线斜率依次减小,反映出固结围压对动应力-动应变关系的影响。另一方面,比较图4(a)、(b)可以看到,相对于 $K_c=1.0, K_c=1.5$ 条件下的动应力-动应变曲线上移。换言之,在较大固结应力比作用下红黏土更容易发生动力变形,如在相同围压300 kPa作用下,动应力达到250 kPa时, $K_c=1.0$ 下试样产生的 $\epsilon_d=0.4\%$,而 $K_c=1.5$ 下试样产生的 $\epsilon_d=0.65\%$ 。

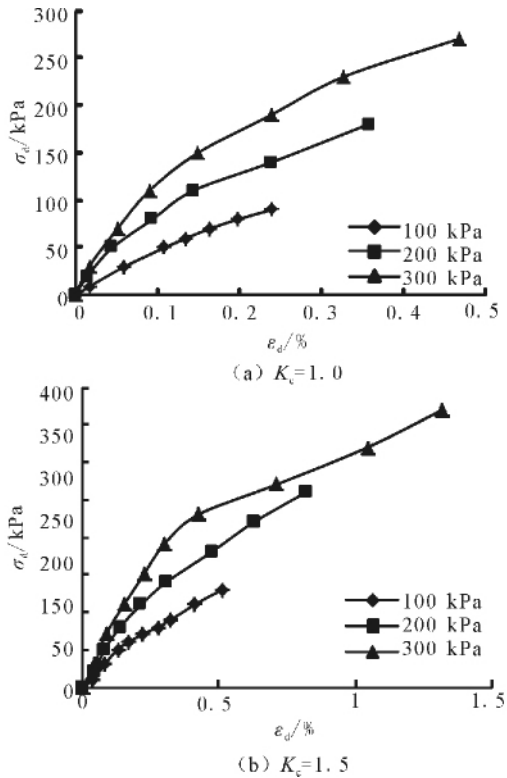


图4 广西红黏土动应力-动应变曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curve of red clay in Guangxi

此外,天然含水率对红黏土的动力特性具有显著影响。从图5可以看出,由于采用的是天然原状土,天然含水率差别不明显,即使含水率在接近3%这一很小的变化范围内,随着含水率的增加,动应力-应变曲线仍表现出向下移动,即土中含水率越高,相同动应力作用下土产生的动变形越大。红黏土的这一动力特征与静力特征是一致的,也就是说红黏土中水分的增加会导致土的静、动强度降低。究其原因,是因为红黏土中富含亲水矿物与黏粒,属一种对水敏感的特殊类土,其普遍存在干硬湿软现象^[9]。因此,虽然红黏土具有较高的强度,但是工程中应重点关注气候环境对其土性的影响,必要时采取防水、隔水措施。

图6为在固结压力为200 kPa作用下,采用不

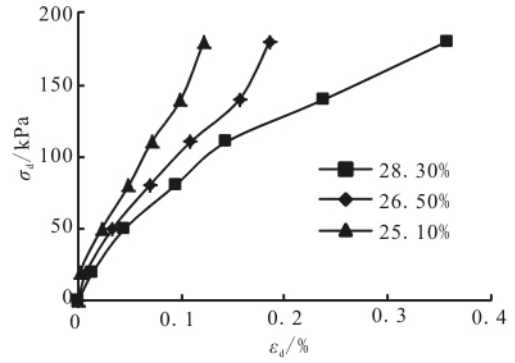


图5 不同含水率条件下广西红黏土动应力-动应变曲线($\sigma_3=200$ kPa)

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of red clay in Guangxi under different water contents ($\sigma_3=200$ kPa)

同循环周次条件下的广西红黏土的动应力-动应变曲线。可以看出,不同于固结围压、固结应力比以及含水率对红黏土动力变形的影响,不同的循环周次下曲线中散点分布规律基本相同。这表明红黏土对于某一动应力作用下循环作用次数的影响不敏感,出现这种现象的主要原因可能是这种条件下红黏土的动力变形基本上以弹性变形为主。

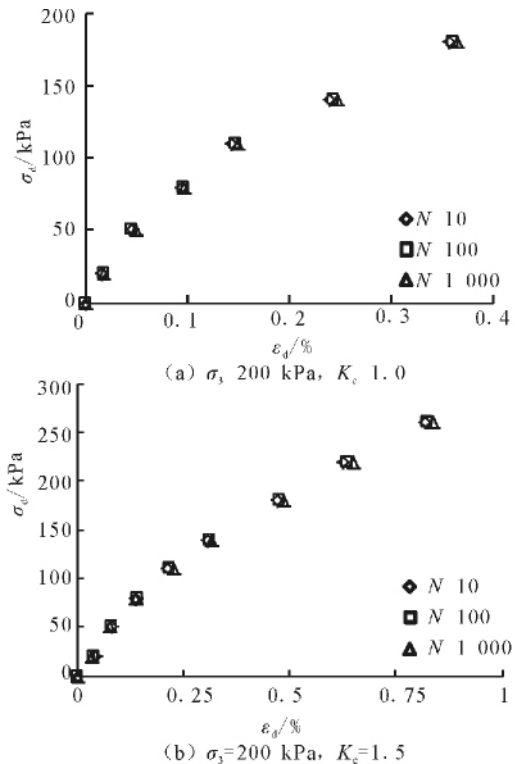


图6 不同振动次数条件下动应力-应变关系曲线

Fig. 6 Dynamic stress-strain curves under different cyclic times

但另一方面,从图6中还可以看出,在相同的固结压力、不同的固结比下,红黏土的动应力-动应变

曲线表现规律并不相同,表现为达到相同应变,偏压状态下所需要的动应力较均压状态所需要的动应力大,并且两者动应力的比值随着动应变的增加而逐渐减小。这主要是因为初始剪应力会导致土样被压密,由于试样的密实度增加,动力荷载施加时土颗粒之间的相对滑动变得相对困难。同时,当固结压力相同时,随着动应力增加,试样受到的剪应力逐渐增大,初始剪应力对试样变形影响效应显得逐渐减弱,致使相同剪应变时,两者所需要的动应力趋于接近。

2.2 动弹性模量

动弹性模量是反应土体动力特性的重要参数,图 7 是不同围压、不同固结比条件下广西红黏土的动弹性模量变化曲线。从图中可见,随着动应变的增加,红黏土的动弹性模量首先快速降低,随着动应变的进一步增大,动弹性模量影响减小的速率逐渐降低,最后趋于稳定,表现为在试样产生相对较大动力变形时,动弹性模量接近一定值,并且这种变化规律随着固结压力的增加越来越明显。另外,对比图 7(a)与(b)可以看出,固结应力比对于动弹性模量的影响较大,虽然不同固结应力比下的 $E_d-\epsilon_d$ 曲线形状相同,但固结应力比越大,动弹性模量的最终稳定值越小,反映在图 7(a)中 E_d 最终接近于 40 kPa,而图 7(b)中 E_d 最终接近于 25 kPa。

图 8 展现的是含水率对广西红黏土动弹性模量的影响,与动应力-动应变规律相同,土的含水率的增加会导致其动弹性模量的降低。

为了更好地了解广西红黏土的循环荷载作用下的变形特性,针对本文得到动弹性模量-动应变关系做进一步分析。绘制不同固结应力比和围压条件下的 $1/E_d-\epsilon_d$ 关系曲线(图 9)。由图 9 可以看出, $1/E_d$ 与 ϵ_d 之间呈很好的线性关系,可以近似用线性方程对 $1/E_d$ 与 ϵ_d 之间关系进行拟合,其关系符合直线关系,表达式为

$$1/E_d = a + b\epsilon_d \quad (5)$$

式中, a, b 均为试验参数,分别为 $1/E_d-\epsilon_d$ 关系直线的截距和斜率。根据式(5)对广西红黏土的动三轴试验数据拟合,模型参数见表 3,拟合结果见图 9。分析可知,不同固结应力比 K_c 作用下,广西红黏土动本构参数 a, b 随围压增加均呈现出减小的趋势。式(5)表示的即为 Konder 双曲线模型^[10],图 9 表明利用 Konder 模型可以较好地描述广西原状红黏土的动本构关系。 $E_d-\epsilon_d$ 关系拟合的相关系数 R^2 普遍达到 0.976 以上,与文献[5]中的结论相近。

2.3 阻尼比

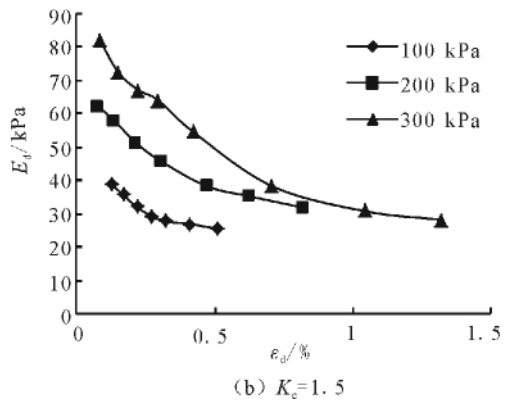
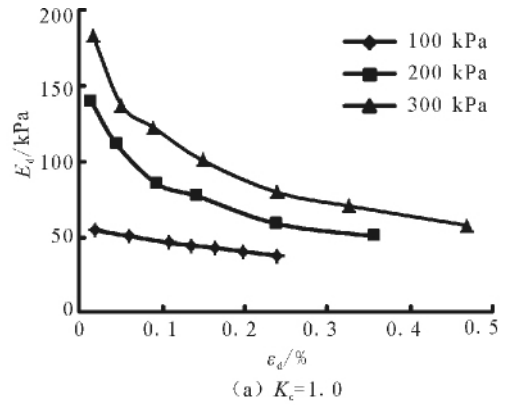


图 7 不同围压、不同固结比条件下原状红黏土动弹性模量-动应变曲线

Fig. 7 Dynamic elastic modulus-strain curves of red clay under different confining pressures and consolidation ratios

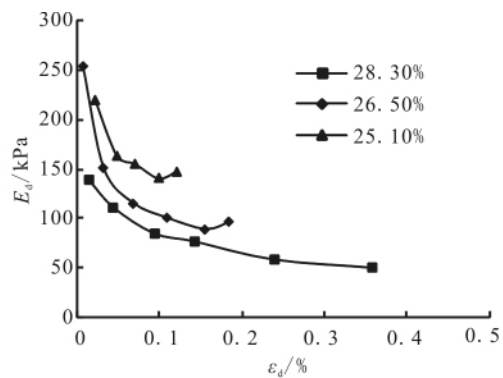


图 8 不同含水率的原状红黏土动弹性模量-动应变曲线

Fig. 8 Dynamic elastic modulus-strain curves of red clay with different water contents

土的阻尼比反映土体在动荷载作用下能量因内部阻力而损失的性质,是土体重要的动力学特性参数。

图 10 为广西红黏土的阻尼比与动应变关系曲线。从中可以看出,不同围压和不同固结比条件下红黏土的阻尼比整体上随着动应变的增大逐渐增大。但本次试验得到的数据离散性较大,在一定的

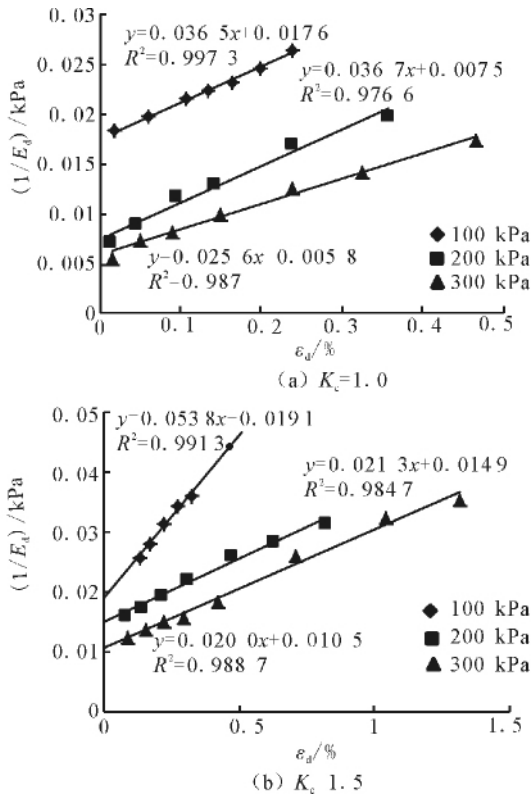


图9 原状红黏土动弹性模量-动应变关系拟合结果
Fig.9 Fitting results of dynamic elastic modulus-strain of undisturbed red clay

趋势范围内交错分布。这说明红黏土阻尼比变化范围受到围压和固结比的影响,在一个较宽的范围内分布。

表3 不同围压和固结应力比条件下参数a、b拟合结果

Table 3 Fitting results of parameters a and b under different confining pressures and stress ratios

固结应力比/ K_c	围压/kPa	参数	
		a	b
1.0	100	0.017 6	0.036 5
	200	0.007 5	0.036 7
	300	0.005 8	0.025 6
1.5	100	0.191	0.053 8
	200	0.014 9	0.021 3
	300	0.010 5	0.020 0

另外,与前述分析的规律相同,含水率也会随红黏土的阻尼比影响较大,属该土的动力特性的敏感因素。表现在图11中,随着含水率的增加红黏土的阻尼比逐渐增大。

3 结论

本文在室内动三轴试验的基础上,分析内因(含水率)、外因(固结比、固结围压和振动次数)对广西上林县原状红黏土动力特性的影响,所得结论对于

该地区路用红黏土动力特性设计和数值计算具有一定的参考价值,重要结论如下:

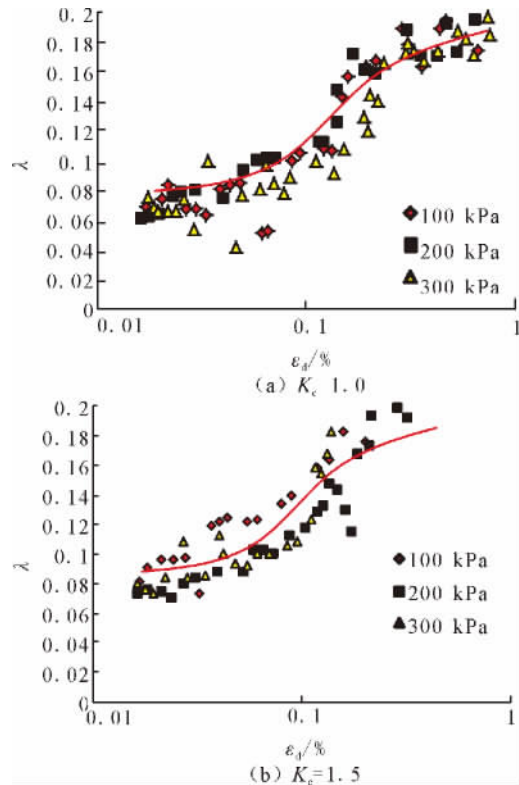


图10 原状红黏土阻尼比-动应变曲线
Fig.10 Damping ratio-strain curves of undisturbed red clay

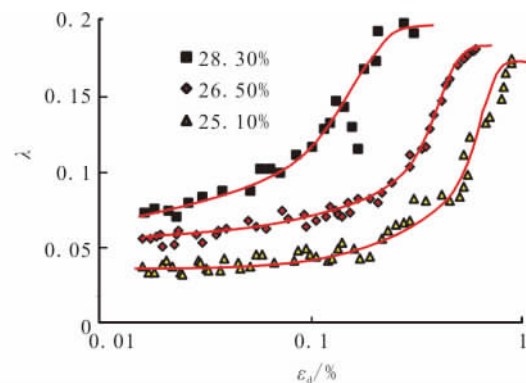


图11 不同含水率下原状红黏土阻尼比-动应变曲线
Fig.11 Damping ratio-dynamic strain curves of undisturbed red clay with different water contents

(1) 广西上林县原状红黏土在一定条件下动应力-动应变关系符合Konder模型,在相同的围压条件下,由于初始剪应力的影响,达到相同的动应变,在均压固结条件下所需的动应力比在偏压固结的条件下所需要的动应力要小。对试验数据利用Konder模型进行拟合得到相关模型参数。

(2) 原状红黏土的动弹性模量随着动应变的增

加而减小,且减小的幅度随应变的增加逐渐减小;初始应力状态对动弹性模量的影响相对其他因素而言最为显著。

(3) 固结应力比、围压、含水率等对原状红黏土阻尼比均有影响,综合反应在阻尼比随动应变发展的趋势中,阻尼比离散性较大,取值范围一般在 0.1~0.2 之间。

参考文献(References)

- [1] 谈云志. 压实红黏土的工程特征与湿热耦合效应研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2009.
TAN Yun-zhi. Study on Engineering Characteristics and Moisture-heat Coupling Effect of Compacted Laterite Soil[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan),2009. (in Chinese)
- [2] 柏巍. 裂隙性红黏土的工程特性及其电导特性试验研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2011.
BAI Wei. Study on Engineering and Electrical Conductivity Characteristics of Fissured Laterite Soil[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan),2011. (in Chinese)
- [3] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(5):141-161.
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the Techniques for Special Soils and Slopes[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(5):141-161. (in Chinese)
- [4] 汤康民. 红黏土动力性质的研究[J]. 西南交通大学学报,1993,28(4):72-77.
TANG Kang-min. Experimental Investigation on the Dynamic Properties of Red Clay[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,1993,28(4):72-77. (in Chinese)
- [5] 刘晓红. 高速铁路无砟轨道红黏土路基动力稳定性研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
LIU Xiao-hong. Research on Dynamic Stability of Red Clay Subgrade Under Ballastless Track of High Speed Railway[D]. Changsha: Central South University,2011. (in Chinese)
- [6] M Fall, J P Tisot, I K Cisse. Undrained Behaviour of Compacted Gravel Lateritic Soils from Western Senegal Under Monotonic and Cyclic Triaxial Loading[J]. Engineering Geology, 1997,47(1-2):71-87.
- [7] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程(JTG E40-2007)[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test Methods of Soils for Highway Engineering (JTGE40-2007)[S]. Beijing: China Communications Press,2007. (in Chinese)
- [8] 陈伟. 原状膨胀土非饱和强度特征与动力性能试验研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2007.
CHEN Wei. Study on Unsaturated Strength Characteristics and Dynamic Behavior of Intact Expansive Soil[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan),2007. (in Chinese)
- [9] 谭罗荣,孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京:科学出版社,1997:238-239.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Soil Science of Special Geotechnical Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1997: 238-239. (in Chinese)
- [10] Kongder R L. Hyperbolic Stress-strain Response: Cohesive Soil[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE,1963,89(SM1):115-143.