

王敕鹏, 骆亚生, 刘建龙, 等. 双向动荷载下重塑红黏土动变形特性研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1046-1053. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1046

WANG Mipeng, LUO Yasheng, LIU Jianlong, et al. Dynamic Deformation Characteristics of Remolded Red Clay Under Bi-directional Dynamic Load[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1046-1053. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1046

双向动荷载下重塑红黏土动变形特性研究^①

王敕鹏¹, 骆亚生¹, 刘建龙¹, 李 焱^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029;
3. 江西省水工安全工程技术研究中心, 江西 南昌 330029)

摘要: 利用 SDT-20 型三轴仪探究双向动荷载下红黏土动变形特性。结果表明: 相位差为 0 其他条件相同时红黏土动剪切模量随径向动荷载幅值增加而减小; 双向动荷载下红黏土动剪应变与振动次数近似呈指数型关系增长, 并存在一个临界循环次数; 随含水率升高和固结应力增大, 重塑红黏土破坏模式由受拉破坏变为受压破坏; 径向动荷载幅值的增加使重塑红黏土更容易发生受拉破坏; 双向动荷载下阻尼比随动剪应变增加无明显规律, 动剪应变小于 1% 时阻尼比的变化无规律, 动剪应变大于 1% 时随动剪应变增加阻尼比处于稳定平衡阶段。含水率对阻尼比变化规律有明显影响, 含水率小于 20% 时阻尼比随含水率增大而增大, 含水率大于 20% 时其对阻尼比影响可以忽略。

关键词: 双向动荷载; 红黏土; 动剪切模量; 滞回曲线; 阻尼比

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)06-1046-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1046

Dynamic Deformation Characteristics of Remolded Red Clay Under Bi-directional Dynamic Load

WANG Mipeng¹, LUO Yasheng¹, LIU Jianlong¹, LI Yan^{1,2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;
2. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, Jiangxi, China;
3. Jiangxi Provincial Engineering Technology Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, Jiangxi, China)

Abstract: The dynamic shear modulus and damping ratio are important parameters for describing the dynamic characteristics of the soil. In this study, the dynamic deformation characteristics of red clay under bi-directional dynamic load was investigated by using a SDT-20 dynamic triaxial apparatus. The impact of moisture content, consolidation stress, consolidation ratio, and radial dynamic load amplitude, on the dynamic deformation characteristics of red clay, such as the hysteresis loop, dynamic shear modulus, dynamic stress-strain relationship, and damping ratio, were analyzed. The experimental results show that when the phase difference was 0 and all other

① 收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 江西省水利科学研究院基金项目(SKY201504); 江西省水利厅科技项目(KT201608)

作者简介: 王敕鹏(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程理论与计算方面的研究。E-mail: 1157292332@qq.com。

通信作者: 骆亚生(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail: lyas@public.xa.sn.cn。

conditions were the same, the dynamic shear modulus of the red clay decreased with the increase of radial dynamic load amplitude. The relationship between the dynamic shear strain of the red clay and vibration frequency was approximately demonstrated by an exponential function under a bi-directional dynamic load, and there was a critical cycle number N_{dc} . With the increase of moisture content and consolidation stress, the failure mode of red clay changed from tensile damage to compression damage. Tensile damage was more likely to happen with the increase of radial dynamic load amplitude. The change of the damping ratio did not present a certain rule with the increase of dynamic shear strain under bi-directional dynamic loading. When the dynamic shear strain was less than 1%, there was no regular pattern in the change of the damping ratio, while the dynamic shear strain was more than 1%, and the damping ratio was stable with the increase of dynamic shear strain. The radial dynamic load amplitude had no obvious impact; however, the moisture content had an effect on the damping ratio. When the moisture content was less than 20%, the damping ratio increased with the increase of moisture content; while the moisture content was more than 20%, its influence on the damping ratio was negligible. This study could be used as a reference for the further design of dynamic deformation characteristics and numerical calculation.

Key words: bi-directional dynamic load; red clay; dynamic shear modulus; hysteretic curve; damping ratio

0 引言

红黏土在我国中西部、南方各省市大面积分布,具有低压缩性、高强度等特殊的工程性质^[1-2],其分布地区地震、地质灾害频发,因此研究其力学性质具有较大的实际意义和工程价值。大量学者对红黏土的物理力学性质进行的研究表明,含水率、土体内部结构、赋存条件等因素在很大程度上影响着红黏土的力学性质^[3-4]。

动剪切模量和阻尼比是描述土动力特性的重要参数,对场地土共振、滤波和放大效应等具有显著的影响^[5],对其进行试验研究是土工建筑物抗震设计和动力计算分析所必需的基本依据^[6]。刘晓红等^[7]基于大量室内动三轴试验,研究了不同试验条件下原状结构红黏土动模量衰减规律,发现同等条件下动模量随固结应力、固结比的增大而增大,随含水比的增大而减小。刘晓红等^[8]应用共振柱仪对石灰岩类红黏土进行了动剪切模量和阻尼比的试验研究,发现动剪切模量随动剪应变的增大非线性减小,阻尼比随动剪应变的增大非线性增大。固结应力对动剪模量及阻尼比的影响规律因动剪应变水平的不同而不同:低剪应变水平下,动剪模量随固结应力的增大而增大,阻尼比随固结应力的增大而减小;高剪应变水平下,动剪模量和阻尼比随固结应力的变化规律与低剪应变水平下相反。李剑等^[9]对不同固结应

力下标准红黏土试样进行小应变幅值的共振柱试验研究,得出了重塑红黏土在小应变条件下动剪切模量和阻尼比的变化规律及其影响因素。李剑等^[10]对承受不同应力历史的重塑红黏土样进行了动三轴试验,结果表明在不超过重塑红黏土强度范围内,提高土体压实度、固结应力、固结比和振动频率有利于提高土体动弹性模量。穆坤等^[11]针对广西上林县原装红黏土开展了一系列循环加载动三轴试验,结果表明固结应力比、围压、含水率和振动次数等对阻尼比均有影响。

对于土工抗震设计来说,土体动力特性是关系工程稳定性的关键。谢定义^[12]认为地震剪切波的模拟应该用双向激振三轴仪在轴向和径向施加同频率、等幅值、相位差为 180° 的往复荷载来进行。目前,对重塑红黏土力学特性的研究主要集中于对其静力特性的研究,而在双向动荷载作用下探究红黏土动力特性的研究却鲜有报道。

为了对土工抗震设计提供更加精确的参数,本文似进行双向动荷载作用下的红黏土动剪切模量试验研究,主要探究含水率、固结应力、固结比、径向动荷载幅值对红黏土滞回圈、动剪切模量、应力应变关系曲线和阻尼比的影响,以期得到红黏土在双向动荷载作用下的动变形特性,对红黏土地区工程抗震设计起到一定的指导作用。

1 重塑红黏土动三轴试验

1.1 仪器简介

试验仪器采用 SDT-20 型微机控制电液伺服双向土动三轴实验机。仪器主要由轴向荷载施加机构,径向荷载施加机构,三轴压力室,压力室气压提升系统,汽、水施加管路系统,液压动力油源,电气控制部分与微机显示,控制与数据处理部分组成。

试验机轴向激振最大负荷 20 kN;有机玻璃压力室承受最大固结应力 1 MPa;仪器变形精度优于±0.5%;试样直径为 39.1 mm,高度为 80 mm;可采用应力、应变、位移等多种控制方式。

1.2 试验土样

本文试验土样取自江西省东乡县第二中学新校区工地周边,取土深度 3~5 m。天然含水率 21.4%,土粒比重 2.71,最大干密度 1.59 g/cm³,最优含水率 20.58%。土样液限为 43.28%,塑限为 20.47%,根据塑性图分类,土样为低液限黏土。颗粒分析试验结果列于表 1。

表 1 红黏土颗粒分析试验结果

Table 1 Test results of red clay particle

粒径/mm	<0.005	0.005~0.075	>0.075
含量/%	17.88	70.05	12.07

1.3 试验方案

本文拟探究双向动荷载作用下重塑红黏土的滞回圈、动剪切模量、应力应变关系曲线和阻尼比,试验部分包括在相同初始循环偏应力和不同径向动荷载幅值下进行的等压、偏压固结试验,试验方案如表 2 所列。试验中,循环偏应力为轴向动荷载与径向动荷载的差值,即 $q_d = \sigma_{dv} - \sigma_{dh}$;初始循环偏应力则为初始轴向动荷载幅值与径向动荷载幅值的差值,本试验保持初始循环偏应力为 0 不变,即 $q_{ds} = \sigma_{dvms} - \sigma_{dhm} = 0$ 。试样剪切采用固结不排水方式,待 30 min 试样的轴向变形不大于 0.01 mm 时,认为试

表 2 试验方案一览表

Table 2 Testing program

干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	含水率 w /%	固结 方式	固结 应力 σ_{3c} /kPa	固结比 k_c	径向动荷 载幅值 σ_{dhm} /kPa
1.51	14	等压固结	100	1	0
	17		200		
	17		300		
	20	偏压固结	100	1.25	10
	23			1.50	30
	26			1.72	50

样固结稳定。固结完毕后进行双向激振,波形为正弦波,频率为 1 Hz,相位差为 0。试验采用重塑试样。

1.4 加载方法

轴向动荷载采用分级加载,荷载幅值逐级递增,递增幅度 10 kPa,径向动荷载幅值保持不变。每级荷载激振 10 次后立即进行下级加载,直至试样轴向动应变大于 5%,认为试样破坏。分析数据时采用每一级动荷载第 5 周次的数据进行分析。荷载形式如图 1 所示。

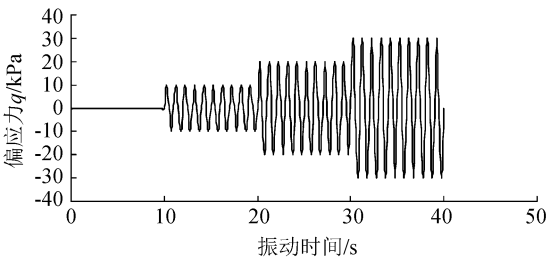


图 1 分级动三轴试验循环偏应力荷载波形示意图

Fig.1 Loading waveform of cyclic deviatoric stress in dynamic triaxial test

2 试验结果及分析

2.1 双向动荷载下红黏土的动应力应变关系曲线

图 2 为不同径向动荷载幅值下红黏土的动应力应变关系曲线。当固结应力为 100 kPa 时,径向动荷载幅值越大即初始双向动荷载耦合作用越强,施加动荷载初期动应力应变关系曲线更陡、更高;当固结应力为 200 kPa 和 300 kPa 时,随着初始双向动荷载耦合作用的增强,动应力应变关系曲线先变陡、变高,再变缓、变低。这主要是因为固结应力较小时,预压密作用不够充分,红黏土在双向动荷载耦合作用下的动变形发展经历了短暂的振动压密阶段。初始双向动荷载耦合作用越强,则振动压密作用越强,轴向动荷载幅值到达同一水平时经历的振动循环次数相对越小,初始径向动荷载幅值较大时比其较小时达到相同的动应变需要相对更大的双向动荷载耦合作用和相对更多的振动循环次数,表现为动应力应变关系曲线初期更陡、更高,后期更高;而固结应力较大时,预压密作用较为充分,双向动荷载耦合作用对土体的振动压密作用减弱,红黏土在较小初始双向动荷载耦合作用下动变形的发展经历了短暂的振动压密阶段后进入振动剪切阶段,而在较大的初始双向动荷载耦合作用下土体甚至不经历振动压密阶段而直接进入振动剪切阶段,即较大的初始

双向动荷载耦合作用会更容易促使土体变形的发展,表现为动应力应变关系曲线变缓、变低。

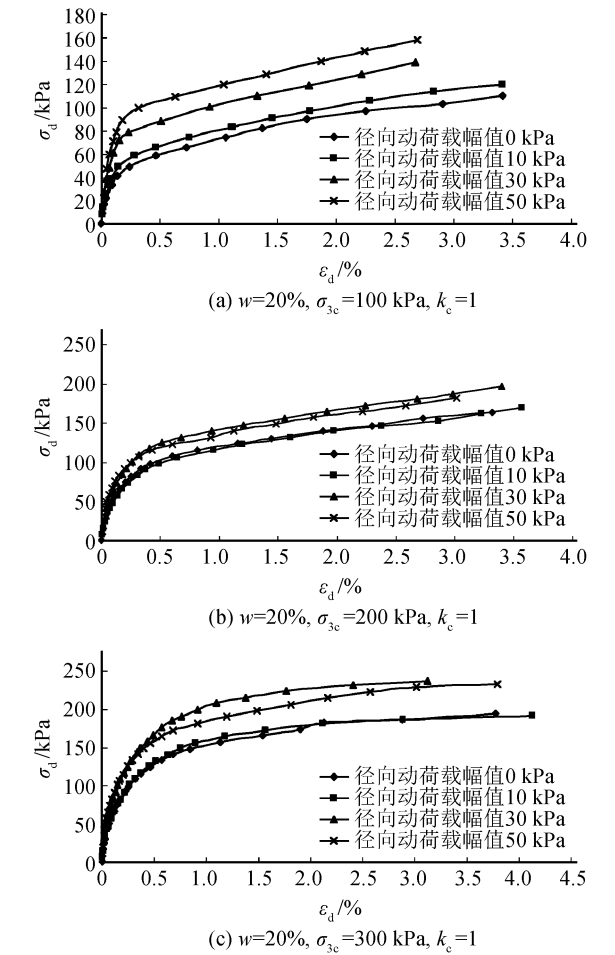


图 2 不同径向动荷载幅值下红黏土的 σ_d - ϵ_d 曲线
Fig.2 σ_d - ϵ_d curves of red clay under different radial dynamic load amplitudes

2.2 双向动荷载下红黏土的动剪切模量

土的动剪切模量是使土体产生单位动剪应变所需的动剪应力,用动剪应力与动剪应变之比表示,它体现了土体抵抗动剪切变形的能力,是场地地震安全性评价中的重要指标。

利用土体在循环荷载作用下的应力-应变滞回曲线(图 3)近似计算土体的动弹性模量,计算公式为:

$$E_d = (q_{dmax} - q_{dmin}) / (\epsilon_{dmax} - \epsilon_{dmin}) \tag{1}$$

式中: q_{dmax} 和 q_{dmin} 分别为每一循环中的最大和最小偏应力; ϵ_{dmax} 和 ϵ_{dmin} 分别为每一循环中的最大和最小动应变。本文拟通过动三轴试验分析红黏土动剪切模量变化规律,故由动弹性模量 E_d 和动应变 ϵ_d 换算出土体的动剪切模量 G_d 和动剪应变 γ_d ,换算公式为:

$$G_d = E_d / [2(1 + \mu)] \tag{2}$$

$$\gamma_d = \epsilon_d \times (1 + \mu) \tag{3}$$

式中: μ 为泊松比,根据试验材料为低液限黏土取 0.4。

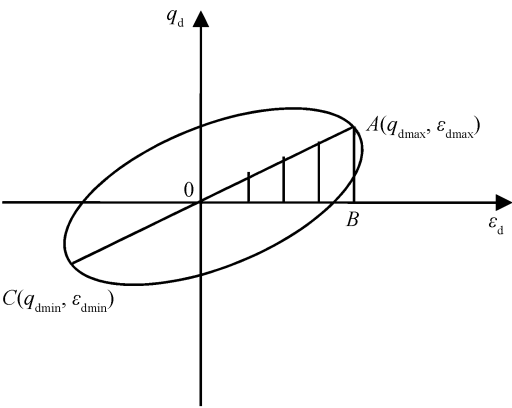


图 3 某一循环下的滞回曲线
Fig.3 Hysteresis curve under a cycle

图 4 为不同径向动荷载幅值下南昌红黏土的 G_d - γ_d 关系曲线。从图中可以看出,不同径向动荷载幅值下红黏土的 G_d - γ_d 关系曲线几乎重合,表明径向动荷载幅值对红黏土的 G_d - γ_d 关系曲线基本没有影响。

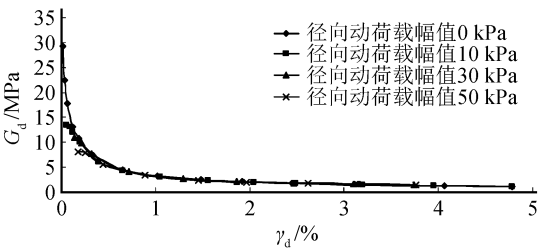


图 4 不同径向动荷载幅值下红黏土的 G_d - γ_d 曲线
($w=20\%$, $\sigma_{3c}=100$ kPa, $k_c=1$)

Fig.4 G_d - γ_d curves of red clay under different radial dynamic load amplitudes ($w=20\%$, $\sigma_{3c}=100$ kPa, $k_c=1$)

图 5 为不同径向动荷载幅值下南昌红黏土的 G_d - N 关系曲线。从图中可以看出,径向动荷载幅值对红黏土 G_d - N 关系曲线有明显影响。相同循环次数下,径向动荷载幅值的增大明显降低了红黏土的动剪切模量,即施加较大的径向动荷载幅值会削弱红黏土抵抗剪切变形的能力,使其在较小的循环次数下发生破坏。这主要是因为施加较大的径向动荷载幅值会加快红黏土的刚度软化,表明剪切波振幅的提高会加速土体发生破坏。

3.3 双向动荷载下红黏土的动剪应变

谢定义^[12]认为土体在循环荷载作用下,其动变形的发展主要经历 3 个阶段:振动压密阶段、振动剪

切阶段和振动破坏阶段,如图 6 所示。图 7 为不同径向动荷载幅值下红黏土的 γ_d - N 关系曲线。可以看出,红黏土在双向动荷载作用下的动剪切变形发展基本也经历了上述 3 个阶段,其动剪应变与振动次数近似呈指数型关系增长,振动次数较小时,动

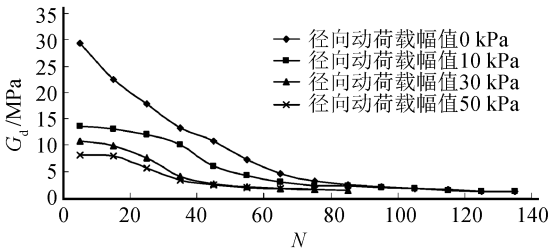


图 5 不同径向动荷载幅值下红黏土的 G_d - N 曲线
($w=20\%$, $\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $k_c=1$)

Fig.5 G_d - N curves of red clay under different radial dynamic load amplitudes ($w=20\%$, $\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $k_c=1$)

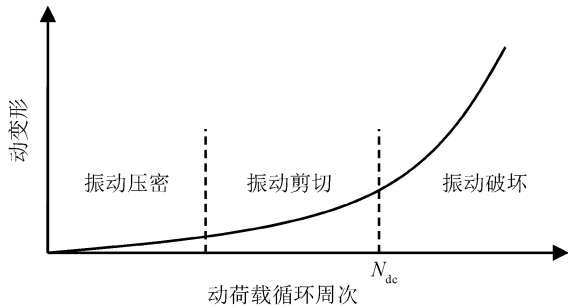
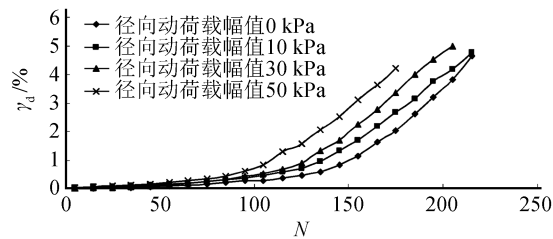
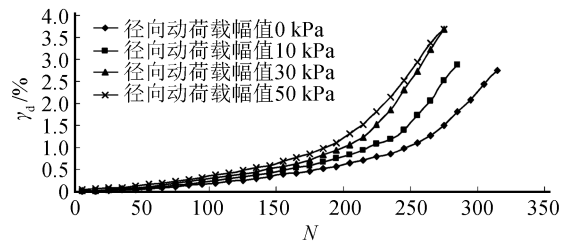


图 6 土体动变形发展曲线

Fig.6 Development curve of soil dynamic deformation



(a) $\tau_s=0\text{ kPa}$, $w=20\%$, $\sigma_{3c}=200\text{ kPa}$



(b) $\tau_s=50\text{ kPa}$, $w=20\%$, $\sigma_{3c}=200\text{ kPa}$

图 7 不同径向动荷载幅值下红黏土的 γ_d - N 关系曲线

Fig.7 γ_d - N curves of red clay under different dynamic load amplitudes

应变发展较慢,随循环次数进一步增加,动应变增加幅度越来越大,曲线越来越陡,说明此时土体已经进入塑性变形阶段,即将破坏。定义振动剪切阶段向振动破坏阶段过渡的循环周次为临界循环周次 N_{dc} ,可以看出 N_{dc} 随着预剪应力 (τ_s) 的增大而增大。这主要是因为预剪应力的施加相当于在振前施加了一个预压密作用,土体孔隙比减小,试样更加密实,颗粒间摩擦力增大,抵抗剪切变形的能力增强。由图中还可以看出,随着径向动荷载幅值的增加,红黏土在较小的循环次数下就产生较大变形, N_{dc} 随着径向动荷载幅值的增大而减小。

2.4 双向动荷载下红黏土的滞回曲线

为分析含水率、固结应力和径向动荷载幅值对红黏土滞回曲线的影响,图 8、9 和图 10 分别绘制了不同物态和应力状态下红黏土的滞回曲线,每条滞回曲线均为该试样在破坏振级最后一周的偏应力与轴向应变关系曲线。

图 8 和图 9 分别为不同含水率和固结应力下南昌红黏土的滞回曲线。从图中可以看出,含水率和固结应力对试样的破坏模式有明显影响,含水率较低、固结应力较小时,试样的拉伸变形发展较快,并

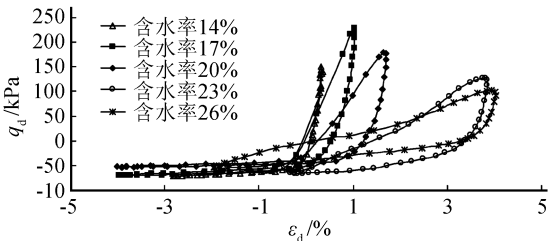


图 8 双向动荷载下含水率对滞回曲线的影响
($\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $\sigma_{dhm}=30\text{ kPa}$, $k_c=1$)

Fig.8 Effect of moisture content on hysteretic curve under bi-directional dynamic load ($\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $\sigma_{dhm}=30\text{ kPa}$, $k_c=1$)

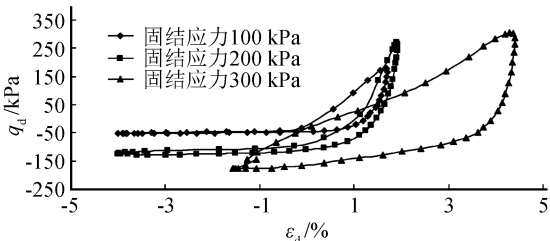


图 9 双向动荷载下固结应力对滞回曲线的影响
($w=20\%$, $\sigma_{dhm}=30\text{ kPa}$, $k_c=1$)

Fig.9 Effect of consolidation stress on hysteretic curve under bi-directional dynamic load ($w=20\%$, $\sigma_{dhm}=30\text{ kPa}$, $k_c=1$)

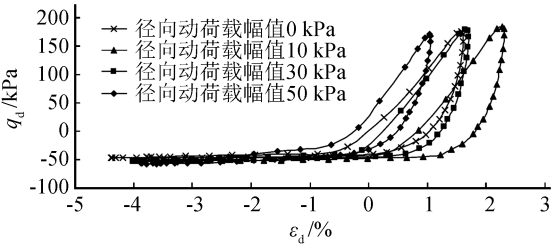


图 10 双向动荷载下径向动荷载幅值对滞回曲线的影响($w=20\%$, $\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $k_c=1$)

Fig.10 Effect of radial dynamic load amplitude on hysteretic curve under bi-directional dynamic load ($w=20\%$, $\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $k_c=1$)

最终呈受拉破坏模式;而含水率较高、固结应力较大时,试样压缩变形发展较快,并最终呈受压破坏模式。这主要是因为含水率较低时,红黏土颗粒间具有较高的联结强度,土体具有较高的抵抗压缩变形的能力,试样在较大的轴向动荷载作用下主要呈拉伸变形,由于重塑红黏土试样抗拉强度很低,因此其拉伸变形迅速发展并最终呈受拉破坏;含水率较高时,红黏土颗粒间联结被破坏,土体抵抗压缩变形的能力较弱,试样在较小的轴向动荷载作用下压缩变形发展较快,并最终呈受压破坏模式。等压固结条件下, $\sigma_{dvms} < \sigma_{3c}$ 时试样压缩变形发展较快, $\sigma_{dvms} > \sigma_{3c}$ 时试样拉伸变形发展较快。当固结应力较小时,试样积累的压缩变形较小,不足以达到破坏条件,试样进入拉伸变形较快发展阶段后拉伸变形迅速发展并最终呈受拉破坏模式;固结应力较大时,试样积累的压缩变形已经达到破坏条件,此时试样呈受压破坏模式。

图 10 为不同径向动荷载幅值下南昌红黏土的滞回曲线。从图中可以看出, $\sigma_{dhm} \neq 0$ 与 $\sigma_{dhm} = 0$ 时试样的破坏模式并没有发生改变,即一定范围内径向动荷载幅值的施加和增加对红黏土的破坏模式没有影响。但随着径向动荷载幅值的增加,滞回曲线向左偏移,红黏土试样的压缩变形发展被抑制,说明径向动荷载幅值的施加会促使试样拉伸变形的发展。这主要是因为固结不排水试验过程中因空气压缩而导致的体应变几乎为零,径向动荷载幅值的施加和增加会加速试样侧向应变的发展,相应的轴向压缩变形被抑制,拉伸变形发展,因此双向动荷载作用下试样偏向于发生受拉破坏。

图 8~10 中滞回圈的形状基本呈“月牙形”而不是“椭圆形”,这是因为动三轴仪做出的实际资料中包含塑性变形,双向动荷载作用下反映在图上表现

为滞回圈呈“月牙形”,表明了径向动荷载的耦合作用对滞回圈的影响。

2.5 双向动荷载下红黏土的阻尼比

阻尼比反映土体在动荷载作用下,由于内摩擦作用不断消耗能量这一特性,其大小等于在一个循环过程中消耗能量与总振动能量的比值。常规法计算阻尼比的公式是:

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

(3)

式中: λ 为阻尼比; ΔW 为滞回曲线所包围的面积; W 为图中 ΔOAB 的面积,如图 3 所示。

它来源于黏弹性体的动力平衡方程式,要求 ΔW 必须是椭圆形状的滞回曲线所包围的面积。由前文可知,双向动荷载下红黏土的滞回圈形状基本呈“月牙形”而不是“椭圆形”,故此时上述方法已不适用于计算分析阻尼比的变化规律。查找相关资料后本文尝试采用刘保健等^[13]提出的滞后角测试法来计算分析阻尼比的变化规律。

从土动力学知识可知土的阻尼比可用下式表达:

$$\lambda = \frac{1}{2} \tan \varphi$$

(4)

式中: φ 为土动应力与动应变间的相位差,即动应变对动应力在相位上的滞后角,反映土的阻尼特性。根据记录的应力应变与实践关系的时程曲线(图 11),在图中求出周期 T 和应力与应变峰值的时间差 Δt ,则相位角:

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ$$

(5)

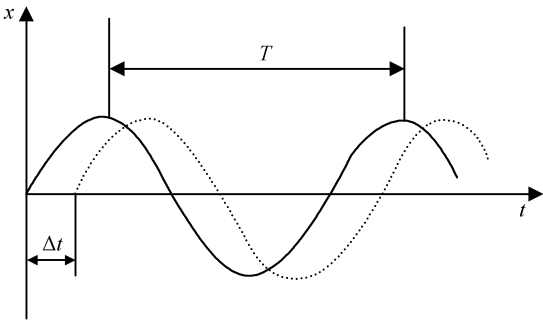
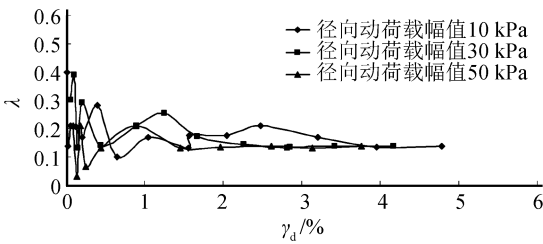


图 11 应力应变时程曲线

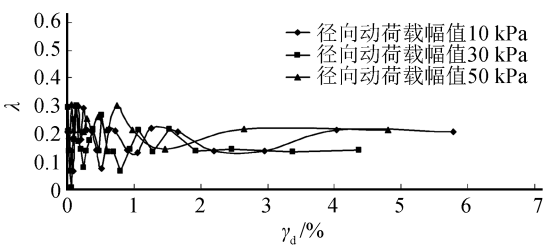
Fig.11 Time history curves of stress and strain

图 12 为不同径向动荷载幅值下红黏土的 λ - γ_d 关系曲线。可以看出,动剪应变较小($\gamma_d < 1\%$)时,阻尼比的变化没有特定规律,而当 $\gamma_d > 1\%$ 时,随动剪应变增加阻尼比处于稳定平衡阶段。这是因为初期施加动荷载时,双向动荷载作用下土颗粒的运动

方向具有随机性,导致土颗粒之间相对错动的大小没有规律性。土颗粒间相对错动较小时,内摩阻力做功相应较少,消耗能量低,使得阻尼比较小;而当土颗粒间相对错动较大时,阻尼比相应较大,故阻尼比随初期动剪应变的增加表现出随机变化的特征。当动剪应变增加到一定程度时,土体进入塑性变形阶段,土颗粒重新排列组合,土体形成新的相对稳定结构,土颗粒之间的相对运动达到相对稳定阶段,应力波传递所消耗的能量趋于稳定,表现为阻尼比稳定平衡。从图中还可看出径向动荷载对阻尼比变化影响的规律性不明显。



(a) $w=20\%$, $\sigma_{3c}=100\text{ kPa}$, $k_c=1$



(b) $w=20\%$, $\sigma_{3c}=300\text{ kPa}$, $k_c=1$

图 12 不同径向动荷载幅值下红黏土的 $\lambda-\gamma_d$ 关系曲线

Fig.12 $\lambda-\gamma_d$ curves of red clay under different radial dynamic load amplitudes

谢定义^[11]认为,当土骨架的孔隙为水和气所填充而组成三相介质时,它会有三类压缩波(即液体的 P_1 波、土骨架的 P_2 波和气体的 P_3 波)和一种横波(土骨架的 S 波)。由物理学知识可知,固体中既能传播横波,也能传播纵波,而液体和气体中只能传播纵波。

图 13 为不同含水率下红黏土的 $\lambda-\gamma_d$ 关系曲线。可以看出, $w<20\%$ 时阻尼比随含水率的增大而增大, $w>20\%$ 时含水率对阻尼比的影响可以忽略不计。这是因为含水率较低时应力波在土颗粒间的传播路径较多,而在气体和液体之间的传播路径较少,这使得能量耗损较小,表现为阻尼比较小;而随着含水率的增加,应力波在土颗粒之间的传播路径减少;而在气体和液体之间的传播路径增加,相应的能量耗损变大,表现为阻尼比增大;当含水率增大到某一

程度,应力波在土颗粒、气体、液体之间的传播路径没有明显变化,不同含水率下阻尼比随动剪应变变化的曲线基本重合。

图 12 和图 13 中大部分阻尼比处于 0.05~0.25 间,这与以往的研究成果^[8]相一致。但当动剪应变较小时会出现阻尼比较大的情况,这与动剪应变较小时阻尼比也较小的常规情况不一致。这可能是由于选择的计算阻尼比的方法所致,使得动剪应变较小时计算出的阻尼比的部分数据具有较低的可信度,因此本文建议采用稳定平衡阶段计算出的阻尼比作为参考。

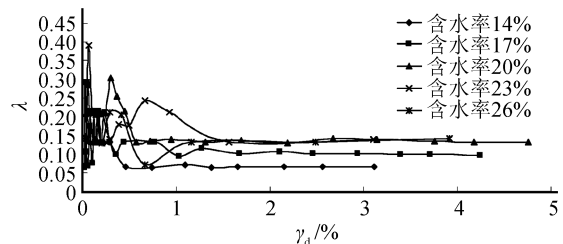


图 13 不同含水率下红黏土的 $\lambda-\gamma_d$ 关系曲线
($\sigma_{3c}=200\text{ kPa}$, $k_c=1$, $\sigma_{dhm}=30\text{ kPa}$)

Fig.13 $\lambda-\gamma_d$ curves of red clay under different moisture content ($\sigma_{3c}=200\text{ kPa}$, $k_c=1$, $\sigma_{dhm}=30\text{ kPa}$)

3 结 论

双向动荷载作用下以不同含水率与不同应力状态下南昌地区重塑红黏土为研究对象,利用 SDT-20 型微机控制电液伺服双向土动三轴实验机对其动剪切模量进行研究,结果表明:

- (1) 径向动荷载幅值的施加和增加对重塑红黏土动剪切模量影响显著,一定条件下红黏土动剪切模量随着径向动荷载幅值的增加而减小。
- (2) 双向动荷载作用下红黏土的动剪应变与振动次数近似呈指数型关系增长,并存在一个临界循环次数 N_{dc} 。振动次数超过临界循环次数后土体进入塑性变形阶段, N_{dc} 随预剪应力的增大和径向动荷载幅值的减小而增大。
- (3) 含水率和固结应力对重塑红黏土的破坏模式有明显影响,随含水率的升高和固结应力的增大,重塑红黏土的破坏模式由受拉破坏变为受压破坏;径向动荷载幅值的增加使重塑红黏土更容易发生受拉破坏。
- (4) 双向动荷载作用下阻尼比随动剪应变的增加没有表现出明显的规律性。 $\gamma_d<1\%$ 时阻尼比的

变化没有规律,而当 $\gamma_d > 1\%$ 时随动剪应变增加阻尼比处于稳定平衡阶段。径向动荷载幅值对阻尼比的变化规律没有明显影响,而含水率则有明显影响,当 $w < 20\%$ 时阻尼比随含水率的增大而增大,而当 $w > 20\%$ 时含水率对阻尼比的影响可以忽略不计。

参考文献(References)

- [1] 黄英,符必昌.红黏土化作用及红黏土的工程地质特性研究[J].岩土工程学报,1998,20(3):40-44.
HUANG Ying, FU Bichang. Research on Laterization and Specific Property of Laterite in Engineering Geology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 40-44.
- [2] 高国瑞.中国红黏土的微结构和工程性质[J].岩土工程学报,1985,7(5):10-21.
GAO Guorui. The Microstructures and Engineering Properties of Red Soil in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(5): 10-21.
- [3] 龙万学,陈开圣,肖涛,等.非饱和红黏土三轴试验研究[J].岩土力学,2009,30(增刊2):28-33.
LONG Wanxue, CHEN Kaisheng, XIAO Tao, et al. Research of General Triaxial Test for Unsaturated Red Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp2): 28-33.
- [4] 孔令伟,罗鸿禧.游离氧化铁形态转化对红黏土工程性质的影响[J].岩土力学,1993,14(4):25-39.
KONG Lingwei, LUO Hongxi. Effect of the Conversion in Form of Free Iron Oxide on the Engineering Property of the Red Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(4): 25-39.
- [5] 孙静,袁晓铭.土的动模量和阻尼比研究评述[J].世界地震工程,2003,19(1):88-95.
SUN Jing, YUAN Xiaoming. A State-of-art of Research on Dynamic Modulus and Damping Ratio of Soils[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 88-95.
- [6] 齐剑峰,栾茂田,杨庆,等.饱和黏土动剪切模量与阻尼比的验研究[J].岩土工程学报,2008,30(4):518-523.
QI Jianfeng, LUAN Maotian, YANG Qing, et al. Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Saturated Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 518-523.
- [7] 刘晓红,杨果林,方薇.红粘土动本构关系与动模量衰减模型[J].水文地质工程地质,2011,38(3):66-72.
LIU Xiaohong, YANG Guolin, FANG Wei. Dynamic Constitutive Relation and Dynamic Modulus Attenuation Model of Red Clay[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(3): 66-72.
- [8] 刘晓红,杨果林,方薇.武广高铁沿线红黏土自振柱试验研究[J].铁道科学与工程学报,2010,7(5):36-40.
LIU Xiaohong, YANG Guolin, FANG Wei. Research on Red Clay Along Wuhan—Guangzhou High-speed Railway by Free Vibration Column Test[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(5): 36-40.
- [9] 李剑,陈善雄,姜领发.重塑红黏土动剪切模量与阻尼比的共振柱试验[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(4):62-68.
LI Jian, CHEN Shanxiong, JIANG Lingfa. Resonant Column Teston Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of the Remolded Red Clay[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2013, 45(4): 62-68.
- [10] 李剑,陈善雄,姜领发.应力历史对重塑红黏土动力特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(9):1657-1665.
LI Jian, CHEN Shanxiong, JIANG Lingfa. Experimental Study on Influence of Stress History on Dynamic Properties of Remolded Red Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1657-1665.
- [11] 穆坤,郭爱国,柏巍.循环荷载作用下广西红黏土动力特性试验研究[J].地震工程学报,2015,37(2):487-493.
MU Kun, GUO Aiguo, BAI Wei. Experimental Study on Dynamic Properties of Red Clay in Guangxi Under Cyclic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 487-493.
- [12] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
XIE Dingyi. Soil Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [13] 刘保健,周加林.土阻尼比的滞后角测试法[J].大坝观测与土工测试,1995,19(4):37-40.
LIU Baojian, ZHOU Jialin. Method of Measuring the Phase Angle of Damping Ratio[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1995, 19(4): 37-40.