

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108053

穆锐, 黄质宏, 姚未来, 等. 分级循环荷载下原状红黏土动力特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 94-102.
MU Rui, HUANG Zhihong, YAO Weilai, *et al.* An experimental study of the dynamic characteristics of the undisturbed laterite under graded cyclic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 94-102.

分级循环荷载下原状红黏土动力特性试验研究

穆锐^{1,2,3}, 黄质宏³, 姚未来¹, 成鑫磊¹, 雷屹欣¹, 杨成⁴

- (1. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401331; 2. 陆军勤务学院岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3. 贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006)

摘要: 为研究循环荷载下原状红黏土路基的动力特性, 采用 SDT-20 型动三轴仪对原状红黏土进行了分级循环动三轴试验, 研究了围压、频率及动应力幅值对原状红黏土的动应力、动弹性模量-动应变 ($E_d-\epsilon_d$) 和动剪切模量-动剪切应变 ($G_d-\gamma_d$) 关系曲线的影响规律。结果表明: 原状红黏土的动应力-动应变关系曲线发展规律可采用 Kondner 模型进行描述; 动应力随动应变先急剧增大后趋于平稳, 并给出了急剧增加时动应变的取值范围, 即 $0\% \sim 0.05\%$; 分析了不同围压、振动频率下红黏土的动弹性模量及动剪切模量的变化规律, 当动应变小于临界值时, 红黏土动弹性模量随动应变的增大而增大; 当动应变大于临界值时, 红黏土材料动弹性模量随动应变的增大而减小, 动剪切模量具有相同变化规律; 结合红黏土的动力特性变化规律, 利用围压对动弹性模量进行折减, 在 Darendeli 模型的基础上建立了红黏土路基动弹性模量、动剪切模量的分段预测模型, 经拟合验证, 本文分段模型的适用性较好, 可预测分级循环荷载下红黏土的动弹性模量-动应变 ($E_d-\epsilon_d$) 和动剪切模量-动剪切应变 ($G_d-\gamma_d$) 关系曲线发展趋势。

关键词: 原状红黏土; 分级循环荷载; 动三轴试验; Darendeli 模型; 动力特性

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)03-0094-09

An experimental study of the dynamic characteristics of the undisturbed laterite under graded cyclic loading

MU Rui^{1,2,3}, HUANG Zhihong³, YAO Weilai¹, CHENG Xinlei¹, LEI Yixin¹, YANG Cheng⁴

- (1. Department of Military Installations, Army Logistics Academy of PLA, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics and Geoenvironment Protection, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China; 3. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 4. Guizhou Construction Science Research and Design Institute Co. Ltd. of CSCEC, Guiyang, Guizhou 550006, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of the undisturbed lateritic soil subgrade under cyclic loading, the dynamic triaxial tests of undisturbed laterite are carried out with the SDT-20 dynamic triaxial apparatus. The effects of confining pressure, frequency and dynamic stress amplitude on dynamic stress, elastic

收稿日期: 2021-08-25; 修订日期: 2021-09-13

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368010; 51668011); 陆军勤务学院青年科研资助项目(2020); 中建四局科技研发课题(CSCEC4B-2019-KT-47)

第一作者: 穆锐(1993-), 男, 硕士, 主要从事岩土力学、基础工程及相关方面的教学与科研工作。E-mail: markmugzdx@163.com

通讯作者: 杨成(1991-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事地基基础实践及研究工作。E-mail: 913194210@qq.com

modulus-strain($E_d-\varepsilon_d$) and shear modulus-shear strain($G_d-\gamma_d$) on dynamic behavior are studied. The results show that the development law of the dynamic stress-strain curve of the undisturbed laterite can be described by the Kondner model. The dynamic stress increases rapidly with the dynamic strain and then tends to be stable, and the range of the dynamic strain value is given, that is, 0 ~ 0.05%. The elastic modulus-strain and shear modulus-shear strain on dynamic behavior of laterite under different confining pressure and vibration frequency are analyzed. When the dynamic strain is less than the critical value, the dynamic elastic modulus of laterite increases with the increase of dynamic strain. When the dynamic strain is greater than the critical value, the dynamic elastic modulus of laterite decreases with the increase of dynamic strain, and the dynamic shear modulus has the same change rule. Combined with the dynamic characteristics of the laterite material, the dynamic elastic modulus is reduced by the confining pressure, which is established on the basis of the Darendeli model. The segmented prediction model of the dynamic elastic modulus and dynamic shear modulus of laterite subgrade material is proposed in the paper. The applicability of the segmented model is verified by the fitting method, which can predict the development trend of $E_d-\varepsilon_d$ and $G_d-\gamma_d$ curves of laterite under the graded cyclic loading.

Keywords: undisturbed laterite; graded cyclic loading; dynamic triaxial test; Darendeli model; dynamic characteristics

一般而言,红黏土是指碳酸盐岩经第四纪以来红土化作用,形成并覆盖于基岩上的棕红或褐黄色等高塑性黏土,俗称红土,广泛分布于云贵高原、南岭山脉南北两侧及湘西、鄂西丘陵山地等地区^[1-2]。近年来,随着西南地区高速铁路的迅速发展,红黏土路基得以广泛应用。然而,高速行驶的列车荷载作用将严重影响路基土的动力特性,这一现象引起工程界广泛关注,成为土木工程领域研究的热点问题。

作为一种区域性特殊土,红黏土在动力特性研究方面取得了一定的成果^[3-4]。李志勇等^[5]、刘晓红等^[6]分别对湖南地区红黏土的动态回弹模量、动模量进行研究,得到相应的预测模型。吴建奇等^[7]、刘晓红等^[8]、罗文俊等^[9]、杨果岳等^[10]分别研究了不同受力状态下重塑红黏土的动态回弹模量、累积变形等动力特征,其中,吴建奇等和刘晓红等均给出了红黏土的累积变形经验公式。刘晓红^[11]、穆锐^[12]、穆坤等^[13]研究了武广铁路段、贵州地区及广西地区红黏土在循环荷载下的动力特性,并对其动力稳定性进行判断。此外,崔宏环等^[14]、谢琦峰等^[15]分别研究了重塑粉质黏土动力特性的影响因素,并给出了相应的建议。上述研究成果对深入认识红黏土的动力特性提供必要基础,也从侧面反映了红黏土动力特性受土体内部结构、区域性、所处的地质年代及荷载作用等因素影响,在循环荷载作用下红黏土将表现出不同的动力特性。同时,根据大量实际工程经验,原始状态下的受力更符合工程实际,但在分级荷载作用下原状红黏土动力特性研究还很鲜见。因此,开展分级荷载下原状红黏土的动

力特性研究很有必要。

通常在交通荷载下路基主要考虑列车运行速度和土体周围受力条件。鉴于此,考虑围压和振动频率 2 个主要因素,采用 SDT-20 型微机控制电液伺服三轴系统对贵阳原状红黏土进行分级循环荷载试验,研究了分级循环荷载下围压、振动频率对红黏土动应力-动应变关系、动弹性模量及动剪切模量的影响及发展规律,并基于传统的 Darendeli 模型建立了原状红黏土动弹性模量-动应变曲线和动剪切模量-动剪切应变曲线的分段预测模型,为贵州及西南地区红黏土路基的动力特性研究提供基础的试验与理论依据。

1 红黏土物理性质及分级循环荷载试验

1.1 红黏土的基本物理指标

本次试验用土取自贵阳某路基工程,如图 1 所示。红黏土试样的基本物理性质指标见表 1。



图 1 贵阳原状红黏土

Fig. 1 Undisturbed laterite in Guiyang

表 1 贵阳红黏土物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of the Guiyang laterite

天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	液性指数 I_L	塑性指数 I_P
1.4	34.9	59.2	23.9	0.3	35.3

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]得到原状红黏土的级配曲线如图 2 所示。由图 2 可知,红黏土的曲率系数 $C_c=0.8$, 不均匀系数 $C_u=7.5$, 该土为级配不良。

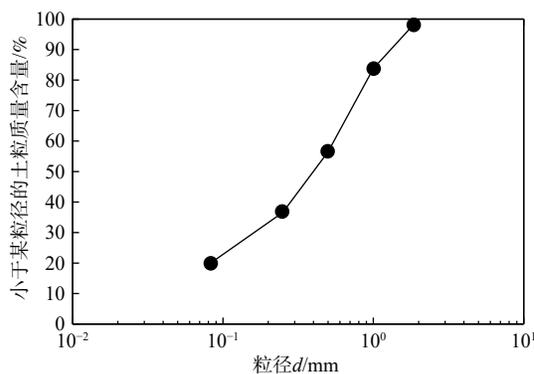


图 2 红黏土的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution (PSD) of laterite

1.2 原状试样的制备

路基作为基床的重要组成部分,土体的原始状态更能反映工程中的实际受力状况。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)第 4.5 条规定进行原状试样制备,试样尺寸 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 如图 1(b) 所示。值得注意的是,在制备过程应注意以下几点:①应保证试样的原状性,即现场取回及运输过程中不扰动或少扰动;②保证原状试样的结构性特征,标识好原状土块的上、下表面;③制备好的原状试样应密封保存,防止或减少水分蒸发;④制备完成后应立即进行试验。

1.3 分级循环加载试验方案

研究土体动力特性最常用的方法是动三轴试验^[17-18]。在交通荷载作用下,路基土的影响深度一般在 4~10 m 范围内,列车荷载对路基作用主要产生低频效应,且通常为多种频率的叠加,与车型、车速以及轨道状态等有关^[10]。综合考虑后本次试验围压、振动频率及固结比的取值见表 2。

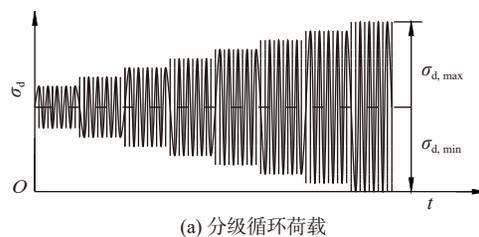
研究表明^[19-20],可采用正弦波形荷载近似模拟列车荷载对路基的振动作用,本次试验选用正弦波荷载,典型分级荷载如图 3(a) 所示。在加载过程中,轴向荷载分级加载,动应力幅值逐级增加,变幅设定为

表 2 试验方案

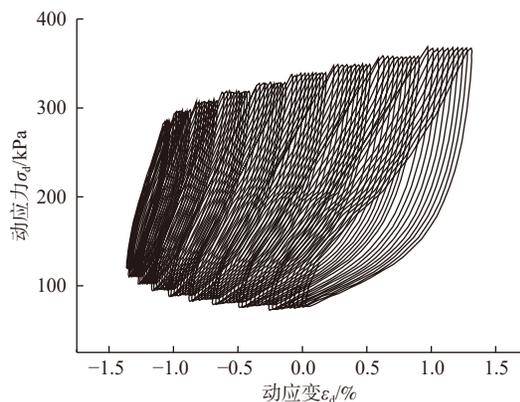
Table 2 Test scheme

组别	围压 σ_3/kPa	固结比 K_c	振动频率 f/Hz	含水率 $w/\%$	动应力幅值 $\sigma_{d\text{max}}/\text{kPa}$
1	100				96
2	150	1.0	1.0, 2.0, 3.0	34.9	144
3	200				192
4	250				240

6 kPa, 每级荷载振动作用次数为 10 次。当分级加载动应力幅值达到设定值或者轴向应变超过 5% 时,视为试验结束^[21]。图 3(b) 给出了分级循环荷载下的经典 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系曲线。



(a) 分级循环荷载



(b) $w=34.9\%$, $\sigma_3=150 \text{ kPa}$, $f=1.0 \text{ Hz}$

图 3 分级循环荷载下原状红黏土的波形及滞回曲线

Fig. 3 Waveform and hysteretic curve of the undisturbed laterite under the graded cyclic loading

2 试验结果及分析

2.1 动应力-应变关系分析

图 4 给出了贵阳原状红黏土的动应力-动应变($\sigma_d-\varepsilon_d$)关系曲线。由图 4 可知,不同振动频率下原状红黏土的动应力随动应变的增大呈先急剧增大后趋于平稳,具有明显的双曲线特征。采用经典的 Kondner 模型^[22]对试验数据进行描述。经拟合验证,拟合曲线的相关系数平方均在 0.96 以上,这说明 Kondner 模型可对原状红黏土的 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系发展规律进行较好描述。由图 4(c) 可知,原状红黏土的 σ_d 随 ε_d 的增大而增大,当试样处于小应变($\varepsilon_d < 0.05\%$)条件时,红黏土的 σ_d 与

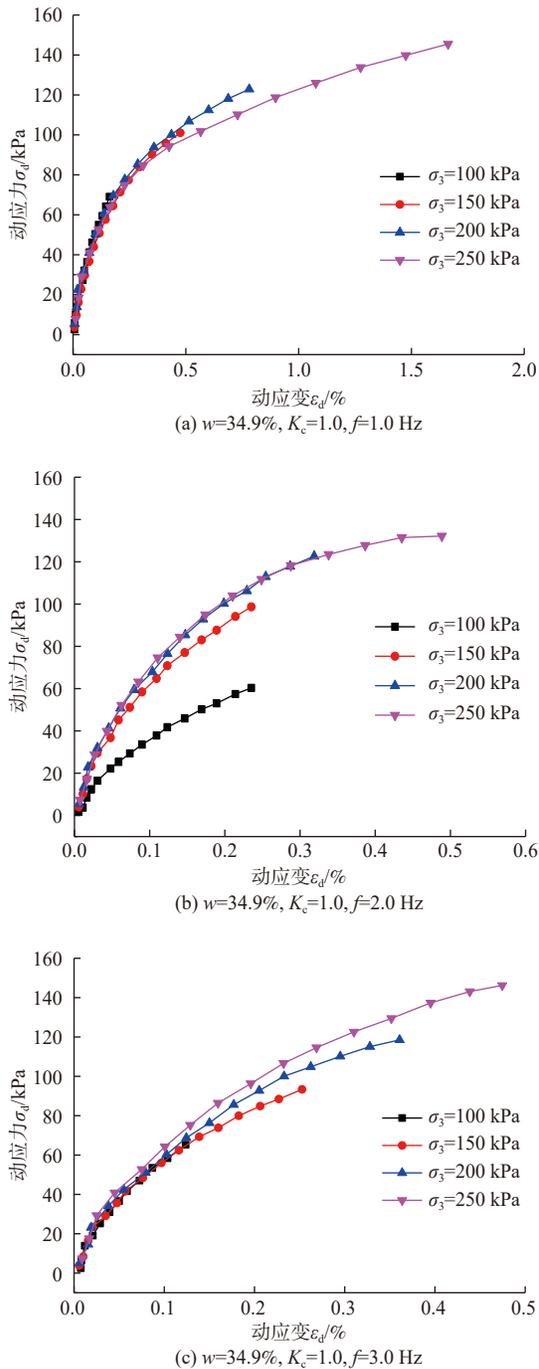


图 4 不同加载频率下原状红黏土的 σ_d - ε_d 关系曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curves of the undisturbed laterite under different loading frequencies

ε_d 表现出显著的线性变化特征, 且斜率较陡; 随着 ε_d 继续增加, σ_d 与 ε_d 将表现出显著的双曲线变化特征, 且曲线斜率逐渐变缓。在相同的动应变条件下, σ_d - ε_d 曲线随围压增大向上扩展, 双曲线开口也逐渐增大, 产生相同的动应变所需加载动应力幅值逐渐增大。当 $\varepsilon_d=0.2\%$ 时, 围压从 100 kPa 增至 250 kPa, 分级加载的 σ_d 从 78.51 kPa 增至 92.15 kPa, 曲线开口明显

增大。在相同试验条件下, 随分级循环加载频率增大, 试验结束时试样产生的最大动应力 ε_{dmax} 逐渐减小。当 $f=1.0$ Hz、围压 σ_3 从 100 kPa 增大为 250 kPa 时, 最大动应变从 0.16% 增为 1.66%。当 $f=3.0$ Hz、围压 σ_3 从 100 kPa 增大为 250 kPa 时, 最大动应变从 0.12% 增为 0.47%, 说明分级循环荷载作用的快慢对试样最大动应变产生较大影响。

显而易见, 围压和振动频率对红黏土试样的 σ_d - ε_d 关系发展规律影响较大。究其原因, 首先考虑红黏土由大量黏性颗粒组成, 当试样处于小应变时, 以弹性变形为主且动应力作用明显。在分级循环荷载下, 随着动应力逐渐增大, 黏粒间孔隙不断缩小, 围压作用使试样变形能力增强, 曲线快速扩展。同理, 随着振动频率增大, 分级循环荷载对试样的作用次数增多, 作用时间缩短, 动应力作用不完全, 试样处于弹性变形为主、塑性变形为辅的受力状态, 产生的最大动应变 ε_{dmax} 越小。因此, 提高围压、增大振动频率可抑制原状红黏土动应力动应变双曲线的扩展, 同时还可增强试样的变形能力。

2.2 动弹性模量与动剪切模量特性

在动三轴试验中, 试验初期动应变较小, 通常在分析时往往被忽略。为全面研究原状红黏土在不同试验条件下的整个试验过程中动弹性模量与动剪切模量的变化规律, 结合试验数据绘制了 E_d - ε_d 、 G_d - γ_d 关系曲线, 如图 5、图 6 所示。

由图 5 可知, 红黏土的动弹性模量 E_d 随动应变 ε_d 的增大呈先急剧增大后急剧变小, 最后趋于平缓的变化规律。研究发现, 试验初期试样处于小应变状态, 随着动应力的逐渐施加, 围压逐渐变大, 试样的变形能力迅速提高, 达到最大值 E_{dmax} , 但作用时间极短, 试样产生动应变不完全, 近似趋于零, 称为临界动应变 ε_{der} 。当超过最大动弹性模量 E_{dmax} 时, 塑性变形开始累积增加, 弹性变形减弱, 动弹性模量随动应变增加呈先以较大幅度减小后趋于平缓。在相同动应变条件下, 动弹性模量随围压的增大而增大, E_d - ε_d 曲线向上扩展。在分级循环荷载下黏粒间孔隙逐渐变小, 围压越大变化程度越小, 这说明提高围压, 红黏土试样的抵抗变形能力越强, 动弹性模量 E_d 越大。

由图 6 可知, 对比动弹性模量 E_d - ε_d 曲线的变化规律, 原状红黏土的动剪切模量 G_d 与动剪切应变 γ_d 变化规律与动弹性模量 E_d 的变化规律一致, 具有以下特征: (1) 在动剪切应变较小情况下, G_d 随 γ_d 呈线性变化特征, G_d 随 γ_d 增大急剧增大; (2) 随着 γ_d 的逐渐增

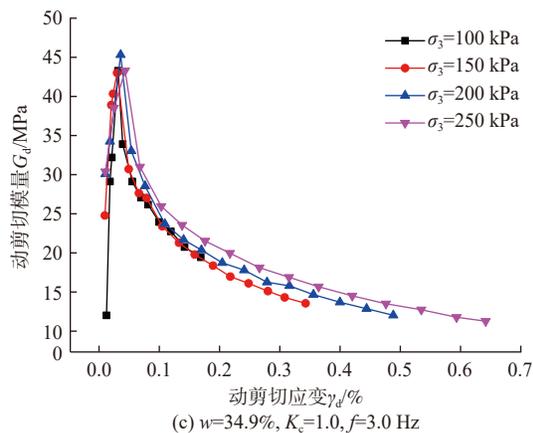
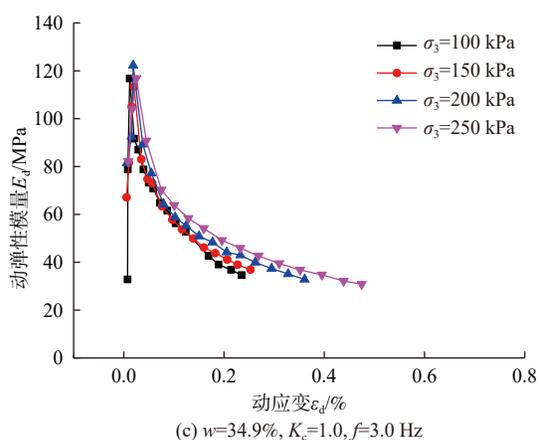
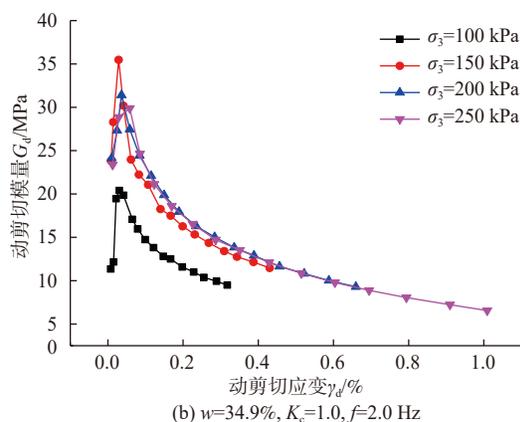
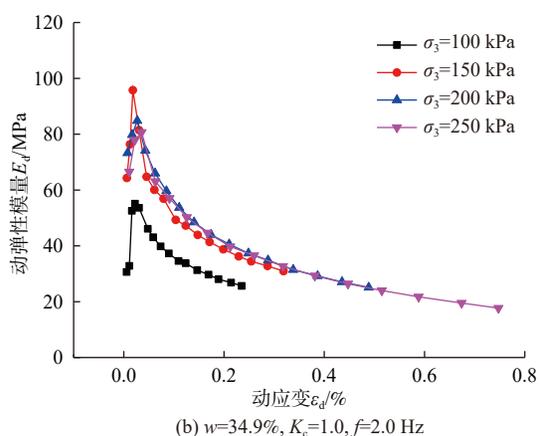
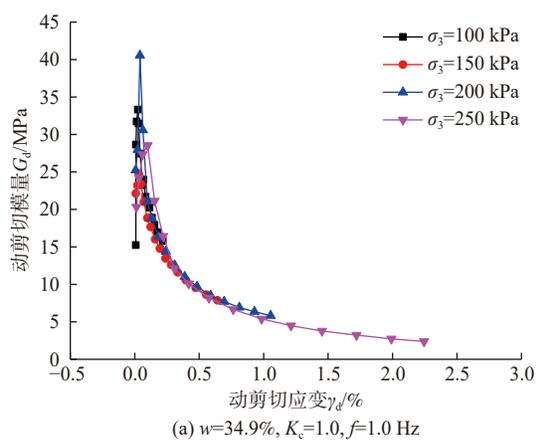
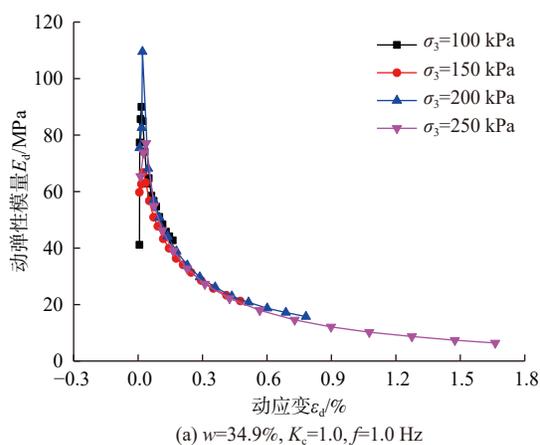


图 5 不同围压下原状红黏土动弹性模量变化曲线

图 6 不同围压下原状红黏土动剪切模量变化曲线

Fig. 5 Dynamic elastic modulus-stain curves of the undisturbed laterite under different confining pressures

Fig. 6 Dynamic shear modulus curves of the undisturbed laterite under different confining pressures

大, G_d 随 γ_d 呈双曲线变化特征。同理, 在分级循环荷载下, 提高围压可增强原状红黏土在剪切面上的抗滑移能力, 增强荷载频率可降低原状红黏土的最大动剪切应变 $\gamma_{d\max}$ 值。

2.3 动弹性模量与动剪切模量的分段模型

国外许多学者对土体动弹性模量与动剪切模量计算模型进行了研究, 例如: 广泛应用的 Hardin-

Drnevich 模型、Davidenkov 模型、Ramberg-Osgood 模型^[23] 以及对 Hardin-Drnevich 模型进行修正的 Darendeli 模型^[24] 等。由前文分析可知, 动弹性模量与动应变 (E_d - ε_d) 关系曲线中动弹性模量会出现极大值, 将规律曲线分为 2 段, 如图 5 所示。将曲线最高点对应的动应变定义为临界动应变 ε_{dcr} , 当 $\varepsilon_d < \varepsilon_{dcr}$ 时, E_d - ε_d 关系曲线变化规律呈良好的线性关系; 当 $\varepsilon_d > \varepsilon_{dcr}$ 时, E_d - ε_d 关

系曲线变化规律呈双曲线关系, 可采用 Darendeli 模型来描述:

$$E_d = \frac{1}{a + b\varepsilon_d^c}, \varepsilon_d > \varepsilon_{dcr} \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c ——试验拟合参数。

当 $\varepsilon_d < \varepsilon_{dcr}$ 时, 在分级循环加载频率为 $f=3.0$ Hz, 绘制归一化 $E_d/E_{dmax}-\varepsilon_d/\varepsilon_{dcr}$ 关系曲线, 如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知, 假定 $E_d/E_{dmax}-\varepsilon_d/\varepsilon_{dcr}$ 关系为:

$$E_d = E_{dmax} \left[m \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{dcr}} \right) + n \right] \quad (2)$$

式中: m 、 n ——拟合参数。

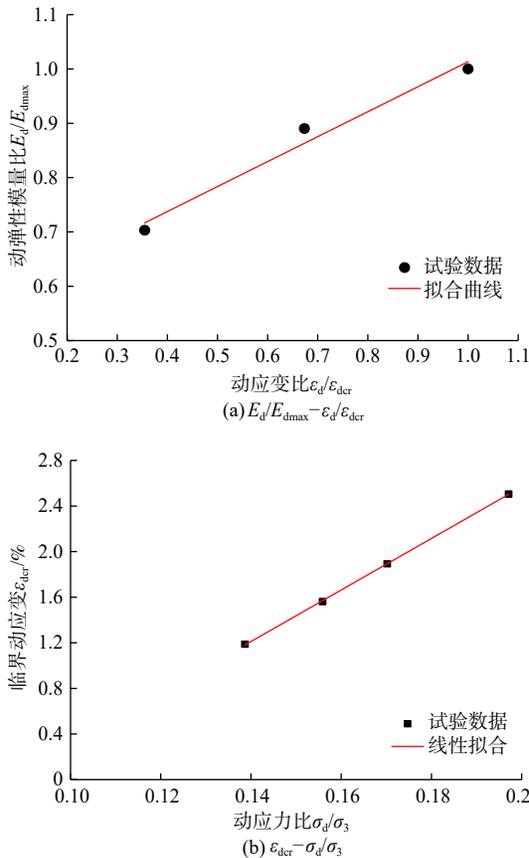


图 7 动弹性模量和动应变归一化关系曲线

Fig. 7 Normalized relationship curves between the dynamic elastic modulus and dynamic strain

前文分析已表明, 振动频率对动弹性模量影响不大。因此仅考虑围压对最大动弹性模量 E_{dmax} 的影响, 则最大动弹性模量 E_{dmax} 与围压 σ_3 存在以下关系^[25]:

$$E_{dmax} = D p_{atm} \left(\frac{\sigma_3}{p_{atm}} \right)^r \quad (3)$$

式中: p_{atm} ——大气压强/kPa;

D ——大气压 100 kPa 时, 最大动弹性模量 E_{dmax} 与修正大气压强的比值, 本文取 $D=1.168$, $r=0.0827$, $R^2=0.997$ 。

由式(3)及 Darendeli 模型得到可描述原状红黏土在分级循环荷载作用下的 2 种特征分段模型, 联立式(1)(2)得:

$$E_d = \begin{cases} E_{dmax} \left[m \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{dcr}} \right) + n \right], \varepsilon_d < \varepsilon_{dcr} \\ \frac{1}{a + b\varepsilon_d^c}, \varepsilon_d > \varepsilon_{dcr} \end{cases} \quad (4)$$

式中参数意义同前, 其值均可由试验数据拟合得到。

考虑动应力幅值及围压对临界动应变的影响, 绘制归一化 $\varepsilon_{dcr}-\sigma_d/\sigma_3$ 关系曲线, 如图 7(b) 所示。由此可知, ε_{dcr} 随该点动应力幅值的增大而增大, 随围压 σ_3 的增大而减小, 故令:

$$\begin{cases} k_{cr} = \sigma_d/\sigma_3 \\ \varepsilon_{dcr} = m_1 k_{cr} + n_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: k_{cr} ——临界固结比, 与分级加载受力相关;

σ_d ——对应点的动应力幅值;

m_1 、 n_1 ——试验拟合参数。

联立式(4)(5)得到能够描述原状红黏土动弹性模量 E_d 随动应变 ε_d 变化的分段模型:

$$E_d = E_{dmax} \left[m \left(\frac{\varepsilon_d}{m_1 k_{cr} + n_1} \right) + n \right], \varepsilon_d < \varepsilon_{dcr} \quad (6a)$$

$$E_d = \frac{1}{a + b\varepsilon_d^c}, \varepsilon_d > \varepsilon_{dcr} \quad (6b)$$

同理, 根据动弹性模量、动应变与动剪切模量、动剪切应变之间的关系式推演得到红黏土的 $G_d-\gamma_d$ 曲线模型:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

$$\gamma_d = (1+\nu)\varepsilon_d \quad (8)$$

式中: G_d 、 γ_d ——动剪切模量、动剪切应变;

ν ——红黏土的泊松比, 可由试验测得。

将式(5)(6)代入式(4)推导红黏土的 $G_d-\gamma_d$ 曲线分段模型, 因此进一步简化得:

$$G_d = G_{dmax} \left[M \left(\frac{\gamma_d}{m_2 k_{cr} + n_2} \right) + N \right], \gamma_d < \gamma_{dcr} \quad (9a)$$

$$G_d = \frac{1}{A + B\gamma_d^c}, \gamma_d > \gamma_{dcr} \quad (9b)$$

$$G_{dmax} = \frac{1}{A + B\gamma_{dcr}^c}, \gamma_d = \gamma_{dcr} \quad (10)$$

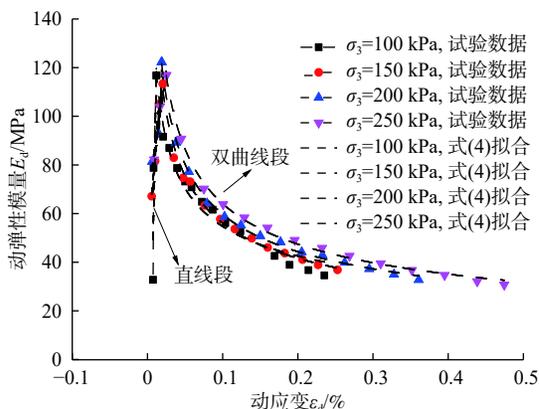
式中; G_{dmax} ——最大动剪切模量;

M 、 N 、 m_2 、 n_2 、 A 、 B 、 C ——试验拟合参数。

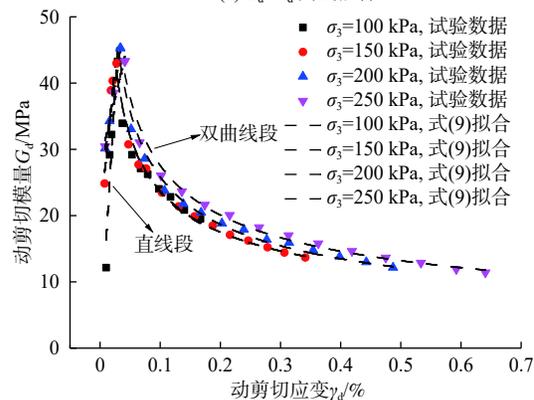
研究发现, 拟合参数间存在比例关系, 即 $A=k_1a$ 、 $B=k_2b$ 、 $C=k_1c$ 、 $M=k_4m$, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为比例系数, 由试验数据拟合得到。

2.4 分段模型合理性验证

为验证本文动弹性模量 $E_d-\varepsilon_d$ 曲线和动剪切模量 $G_d-\gamma_d$ 曲线分段模型的适用性, 采用式(6)和式(9)对试验条件 $w=34.92\%$ 、 $K_c=1.0$ 、 $f=3.0$ Hz 的试验数据及文献 [26] 的试验数据进行验证, 拟合曲线如图 8、图 9 所示。图 8、图 9 表明, 式(6a)和式(9a)直线模型对试验数据及文献 [26] 试验数据的直线段拟合相关性系数平方均在 0.95 以上; 式(6b)和式(9b)双曲线模型对试验数据及文献 [26] 试验数据的双曲线段拟合相关性系数平方均在 0.99 以上。这说明本文建立的分段模型可较好地描述红黏土试样在分级循环荷载下 $E_d-\varepsilon_d$ 和 $G_d-\gamma_d$ 曲线的分段变化特征, 且适用性较好。同时, 本文模型还可对其他类型土体在分级循环荷载下的动力特性研究提供理论参考依据。



(a) $E_d-\varepsilon_d$ 曲线拟合



(b) $G_d-\gamma_d$ 曲线拟合

图 8 分段模型对试验数据的拟合曲线

Fig. 8 Fitting of the segmented model to the experimental data

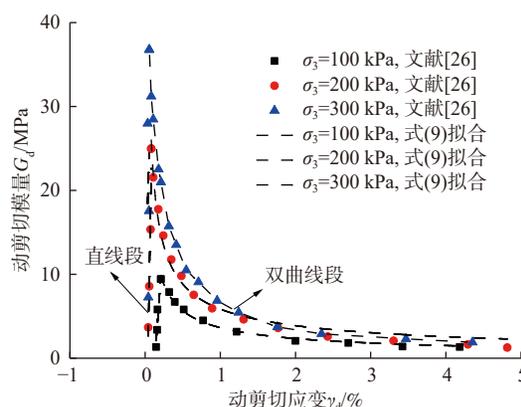


图 9 分段模型对文献 [26] 试验数据的拟合曲线

Fig. 9 Fitting of the subsection model to the dynamic shear modulus relation curve [26]

图 10 给出了比例系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 随围压 σ_3 增大的变化规律。其中, 比例系数 k_1 、 k_4 随围压 σ_3 呈曲线演变规律变化; k_1 、 k_2 随 σ_3 增大而减小, k_3 、 k_4 随 σ_3 增大而增大; 比例系数 k_2 、 k_3 随围压 σ_3 呈相关性较好的一次函数变化规律, k_2 呈线性减小, k_3 呈线性增大。因此, 通过比例系数的演变规律得到围压是影响分段模型直线段的斜率、双曲线段开口大小的关键因素。

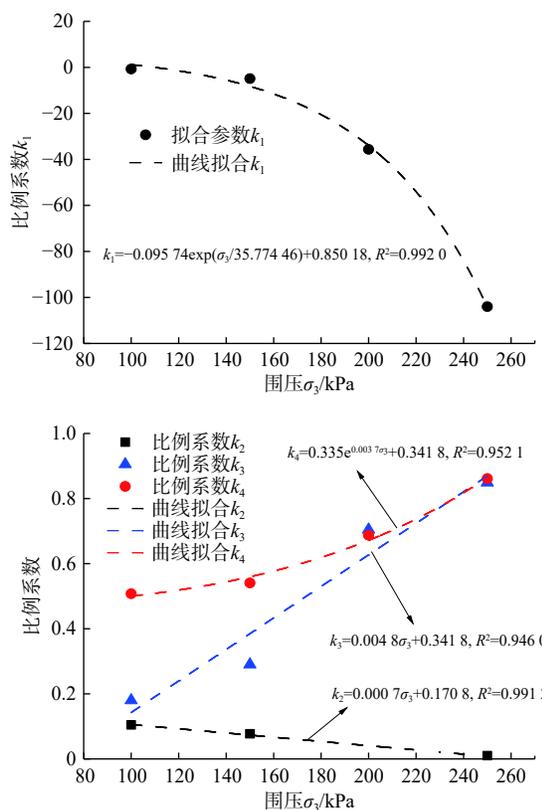


图 10 围压与比例系数的关系

Fig. 10 Relationship between the confining pressure and proportional coefficient

3 结论

(1)试验结果表明,当动应变 $<0.05\%$ 时,试样的动应力增长较快且幅度较明显,最终呈受压破坏。在相同条件下,围压和振动频率均会改变循环荷载对红黏土试样的作用效果,增大围压、减小振动频率将提高其变形能力,同时可抑制试样的双曲线扩展。

(2)分级循环荷载作用下,原状红黏土的动弹性模量随动应变的变化显著。在小应变条件下,动弹性模量随动应变的增大而急剧增加;当动应变超过临界动应变时,动弹性模量随动应变的增大先急剧减小后趋于平稳,动剪切模量随动剪切应变具有相同的变化特征。

(3)围压作用越大,相同动应变及动剪切应变下动弹性模量和动剪切模量越大。振动频率对红黏土的动应变及动剪切应变有显著影响,相同围压作用下,振动频率越大红黏土的动应变及动剪切应变越小。

(4)考虑围压、初期试验变化特征对红黏土动弹性模量-动应变和动剪切模量-动剪切应变关系曲线的影响并结合 Darendeli 模型,建立了红黏土的分级循环荷载下动弹性模量-动应变和动剪切模量-动剪切应变关系的分段模型,即式(6)、式(9)。经试验数据拟合验证,分段模型的适用性较好。

参考文献 (References) :

- [1] 尤志国,杨志年.土力学与基础工程[M].北京:清华大学出版社,2019. [YOU Zhiguo, YANG Zhinian. Soil mechanics and foundation engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese)]
- [2] 工程地质手册编委会.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018. [Editorial Committee of Engineering Geology Manual. Engineering Geology Handbook [M]. 5th ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2007. (in Chinese)]
- [3] 陈正汉,郭楠.非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J].岩土力学,2019,40(1):1-54. [CHEN Zhenghan, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1 - 54. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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(Sup 2): 28 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李志勇,董城,邹静蓉,等.湘南地区红黏土动态回弹模量试验与预估模型研究[J].岩土力学,2015,36(7):1840-1846. [LI Zhiyong, DONG Cheng, ZOU Jingrong, et al. Research on experiment and prediction model of dynamic resilient modulus of laterite soil in Southern Hunan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1840 - 1846. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘晓红,杨果林,方薇.红黏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 & Engineering Geology, 2011, 38(3): 66 - 72. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吴建奇,杨骁,徐旭,等.部分排水条件下饱和红黏土循环试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(7):1309-1316. [WU Jianqi, YANG Xiao, XU Xu, et al. Cyclic triaxial tests on saturated red clay under partially drained condition[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(7): 1309 - 1316. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘晓红,方薇,杨果林.循环荷载下原状结构红黏土累积塑性应变模型[J].水文地质工程地质,2013,40(2):56-62. [LIU Xiaohong, FANG Wei, YANG Guolin. Accumulated plastic strain models of red clay in original structure under cyclic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 56 - 62. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 罗文俊,王海洋,马斌,等.单向循环荷载作用下饱和重塑红黏土的动力特性[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(2):1-9. [LUO Wenjun, WANG Haiyang, MA Bin, et al. Dynamic characteristics of saturated remodeling red clay under uniaxial cyclic loading[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨果岳,程雨竹,徐运龙,等.交通荷载作用下安宁地区超固结重塑红黏土的动力特性试验研究[J].实验力学,2019,34(4):675-683. [YANG Guoyue, CHENG Yuzhu, XU Yunlong, et al. Experimental study on dynamic characteristics of over-consolidated remolded red clay subjected to traffic load in Anning area[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(4): 675 - 683. (in Chinese with English abstract)]

- [11] 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 Xiaohong. Research on dynamic stability of red clay subgrade under ballastless track of high-speed railway[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 穆锐. 贵阳地区红黏土动力特性及其动本构关系研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. [MU Rui. Study on dynamic constitutive relationship and dynamic characteristics of red clay in Guiyang area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 穆坤, 郭爱国, 柏巍, 等. 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, et al. Experimental study on dynamic properties of red clay in Guangxi under cyclic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 487 - 493. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 崔宏环, 王文涛, 何静云, 等. 循环荷载作用下正融粉质黏土强度特征与滞回环演化规律[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 174 - 182. [CUI Honghuan, WANG Wentao, HE Jingyun, et al. Strength characteristics of the melting silty clay under cyclic loading and the evolution law of hysteresis loop[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 174 - 182. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 谢琦峰, 刘干斌, 范思婷, 等. 循环荷载下饱和重塑黏质粉土的动力特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 78 - 83. [XIE Qifeng, LIU Ganbin, FAN Siting, et al. A study of dynamic characteristics of the saturated remolded clayey silt under circle load[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(1): 78 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for soil test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [17] WICHTMANN T, NIEMUNIS A, TRIANTAFYLIDIS T. Strain accumulation in sand due to cyclic loading: Drained cyclic tests with triaxial extension[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(1): 42 - 48.
- [18] GU C, WANG J, CAI Y Q, et al. Undrained cyclic triaxial behavior of saturated clays under variable confining pressure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 40: 118 - 128.
- [19] 刘学毅, 王平. 车辆—轨道—路基系统动力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010. [LIU Xueyi, WANG Ping. Dynamics of vehicle track subgrade system [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010. (in Chinese)]
- [20] 张向东, 刘家顺, 王洪伟. 动荷载作用下高速铁路风积土地基动力特性试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1): 66 - 72. [ZHANG Xiangdong, LIU Jiashun, WANG Hongwei. Experimental study of dynamic characteristics of aeolian soil subgrade subjected to high-speed train dynamic loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1): 66 - 72. (in Chinese with English abstract)]
- [21] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(6): 105 - 134.
- [22] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115 - 143.
- [23] 张明, 廖蔚茗, 王志佳, 等. 黏性土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变关系的统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 256 - 262. [ZHANG Ming, LIAO Weiming, WANG Zhijia, et al. Statistical analysis of the relationship of shear modulus ratio and damping ratio to shear strain for cohesive soil[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 256 - 262. (in Chinese with English abstract)]
- [24] DARENDELI M B. Development of new family of normalized modulus reduction and material damping curves[EB/OL]. 2001.
- [25] 庄心善, 赵汉文, 王俊翔, 等. 合肥膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 759 - 766. [ZHUANG Xinshan, ZHAO Hanwen, WANG Junxiang, et al. Experimental study of dynamic elastic modulus and damping ratio of expansive soil in Hefei[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 759 - 766. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张希栋, 骆亚生. 双向动荷载下黄土的动剪切模量特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2591 - 2598. [ZHANG Xidong, LUO Yasheng. Study of dynamic shear modulus of loess under bidirectional dynamic loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2591 - 2598. (in Chinese with English abstract)]