

南宁地区红黏土循环动力特性试验研究

肖桂元^{1,2}, 刘晓楠^{1*}

1. 桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林 541000;

2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541000

摘要:为研究南宁红黏土在循环荷载下的动力特性,制备动三轴圆柱体试件(以下简称试件)进行系列动三轴试验,探究不同固结围压、循环应力比、加载频率对南宁红黏土动强度衰减和动变形演化特性的影响,分析动弹性模量和阻尼比变化规律。试验结果表明:1)不同加载条件(固结围压、加载频率、循环应力比)下试件的动应力均随循环次数的增大先快速减小后趋于稳定;循环次数相同,动应力随固结围压的增大而增大,随加载频率、循环应力比增大而减小;固结围压、加载频率、循环应力比对试件的动应力有显著影响。2)在固结围压为300 kPa和加载频率为1.0 Hz条件下,试件的抗压强度最大;且在加载循环一定次数后,抗压强度对受力条件的敏感性降低。3)固结围压、循环应力比、加载频率对试件的动弹性模量均有影响,表现为随动应变累积,动弹性模量减小且减小速率变缓;相同动应变下,动弹性模量随固结围压、加载频率的增大而增大,随循环应力比的增大而减小;不同固结围压、加载频率和循环应力比条件下,动弹性模量的倒数与动应变近似线性相关。4)动应变增量相同时,阻尼比变化量随固结围压的增大而减小;随循环应力比的增大先基本不变后减小;随加载频率的增大而减小;阻尼比在一定范围内波动,随动应变的增大而增大。

关键词:红黏土;动三轴试验;动弹性模量;阻尼比;动应变

中图分类号:U416;U213.1

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0044-10

引用格式:肖桂元,刘晓楠. 南宁地区红黏土循环动力特性试验研究[J]. 山东交通学院学报,2025,33(5):44-53.

XIAO Guiyuan, LIU Xiaonan. Experimental study on the cyclic dynamic characteristics of red clay in Nanning area[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2025,33(5):44-53.

0 引言

红黏土广泛分布在我国广西、贵州、云南等地区,普遍具有高天然含水率、高液限、高天然孔隙率等物理性质,红黏土的收缩性和裂隙性等工程地质特性较显著,对道路工程安全存在较大威胁。道路运营中,路基结构中的红黏土承受静荷载作用,同时承受交通运行和机械振动产生的规律性动荷载作用,循环往复作用不断加剧地基土的不均匀沉降,使路面开裂破坏^[1-3]。因此,研究红黏土的动力特性参数、动强度特性和动应变演化等特征,对应用场景的选择以及工程安全监测有重要意义。

目前普遍采用动三轴仪研究循环荷载作用下土体动力特性^[4-6]。土体的固结围压、固结比、含水率、加载时间、加载频率等均对土体动力特性产生不同程度的影响^[7-9]。每次循环加载、卸载过程均会对土体造成一定程度的塑性损伤,土体的抗压强度减小^[10-11]。加载频率会影响土体结构,对土体动强度有显著影响,在动荷载作用下,固结围压、含水率对重塑红黏土动强度和动变形也有较大影响^[12-13]。在动荷

收稿日期:2024-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52169022)

第一作者简介:肖桂元(1976—),男,湖南衡阳人,教授,工学博士,主要研究方向为岩土工程和特殊路基成灾机理,E-mail:xiaoguiyuangit@163.com。

*通信作者简介:刘晓楠(1999—),女,山东济宁人,工学硕士,主要研究方向为岩土工程,E-mail:1078265909@qq.com。

载作用下,土体颗粒间的相互作用力被破坏,或土体颗粒堆积关系改变,土体抗压强度衰减。一般通过累积变形模型预测土体变形,分析土体动变形特性,解决长期循环荷载作用下路基的动力稳定和沉降问题,避免发生工程安全事故。可将预测模型分为两种:一种是理论模型,精度高但计算复杂;另一种是经验模型,精度不及理论模型,但符合工程实践要求,在实际工程中应用广泛。通常根据实验室试验和现场试验的结果建立经验模型,减小计算量。何忠明等^[14]分析不同围压、动荷载幅值和动荷载单次加载时长作用下软土的累积变形发展和刚度软化特性,建立具有较高预测精度的累积变形经验模型。穆锐等^[15]研究循环荷载下红黏土路基的动力特性,建立预测原状红黏土动弹性模量和动剪切模量的分段模型。张炜等^[16]通过黏土循环动力特性试验和循环单剪试验,获取动剪切模量和阻尼比随循环剪应变的变化规律,掌握循环动力特性试验方法,为岩土工程动力学试验研究及数据分析提供技术参考。现有研究成果未包括特殊工程条件下的土体抗压强度及土体内部能量消耗情况,需研究一定范围内的固结围压、循环应力比、加载频率对土体动强度变化的影响,分析土体内部的能量衰减情况。

本文基于场地内施工机械和车辆等对路基红黏土的振动作用,通过动三轴试验研究有限次的荷载作用对红黏土动力特性的影响,结合循环次数、围压、循环应力比和加载频率定量分析土体动强度性能的变化规律,采用循环次数-动应力关系曲线以及动弹性模量、阻尼比等参数评价红黏土的动力特性;引入循环应力比(cyclic stress ratio, CSR)表征动荷载幅值,考虑动荷载幅值的决定作用。研究不同荷载作用对土动力响应、动变形的影响,获取土体动力学参数,为建立经验模型提供数据支撑,以期为道路工程设计以及南宁地区红黏土的开发和稳定性分析奠定试验基础。

1 试验土样与试验方案

试验土样取自广西南宁高速公路某一施工路段,取土位置距地表约 2.5 m,根据文献[17]进行基本物理力学性质测试,结果如表 1 所示。

表 1 南宁红黏土的基本物理力学性质

颗粒密度/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%	液限指数/%	塑性指数/%	初始孔隙比	最大干密度/(g·cm ⁻³)	粒径/mm
2.67~2.70	26.5~27.8	76.7	36.7	0.712	1.43	≤2.0

将所取红黏土风干后碾碎,通过筛孔边长为 2 mm 的土工筛,密封放置于阴凉干燥处。制备土样时,先用一定量的蒸馏水喷洒红黏土,最优含水率为 31%,再放入保湿缸内养护 24 h。采用压法法制备标准直径为 50 mm、高 100 mm 的动三轴圆柱体试件(以下简称试件),将试件真空饱和处理后进行动三轴试验。

采用 GDS 动三轴仪进行动力特性试验,该仪器测量精度和控制精度较高,通过软件 GDSLAB 自动采集及记录数据。设定固结围压 σ_g 分别为 100、200、300 kPa,循环应力比 w 分别为 0.20、0.25、0.30,施加循环正弦波荷载,加载频率 f 分别为 1.0、1.5、2.0 Hz。进行动三轴试验时,打开排水阀,将试件进行均压固结,固结完成后关闭排水阀;再对试件施加动荷载,循环振动约 1 000 次;加载完成后,卸下试件并妥善保存。

2 动强度特性研究

通常需在一定动荷载作用下衡量土体动强度,一般采用应变破坏标准确定某一破坏应变所需的动应力,均压固结的试件在与水平面呈 45°截面上的变化可模拟地基土中水平面上的静应力和动应力变化。试件在与水平面呈 45°截面上的剪切应力

$$\tau_d = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2,$$

式中: σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力。

试件被均压固结,化简后 $\tau_d = \sigma_d/2$,其中 σ_d 为轴向动应力。

从微观角度分析,内部颗粒间的相互作用力决定土体抗压强度。土骨架由碎散颗粒堆积而成,土颗粒间的联结相对薄弱,在动荷载作用下土体结构改变,导致抗压强度发生变化。根据不同固结围压、加载频率、循环应力比下红黏土动强度随循环次数变化的关系曲线,分析各影响因素对土体动强度的影响机理。

2.1 不同固结围压下试件的动应力分析

不同固结围压 σ_g 下,试件动应力 σ_d 随循环次数 N 的变化关系曲线(σ_d-N)如图1所示。

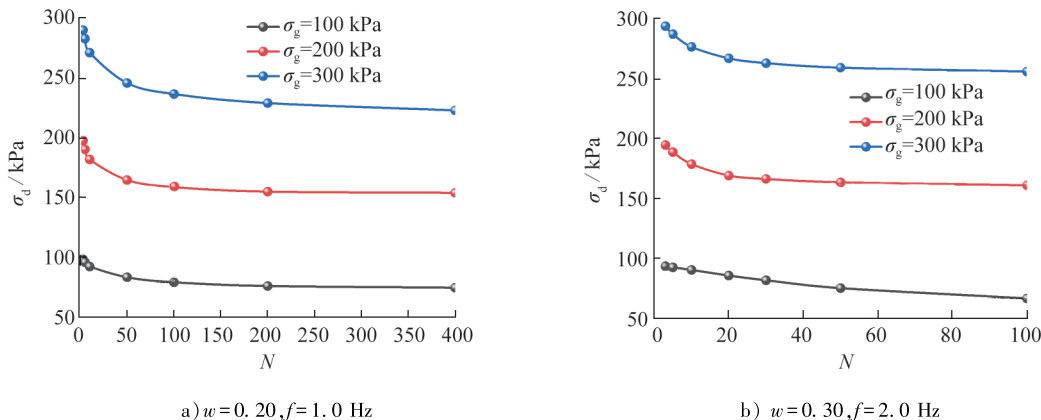


图1 不同固结围压下试件动应力随循环次数的变化关系曲线

由图1可知:不同固结围压、循环应力比、加载频率下,6条 σ_d-N 曲线发展趋势相似,试件的动应力均随循环次数的增大而先快速减小后缓慢减小,超过一定循环次数后,试件的动应力不再衰减,到达稳态;固结围压越大,试件的动应力减幅越大,原因是在动荷载作用下,土体结构遭到破坏,颗粒间作用力丧失,土体动强度衰减;固结围压越大,土体越密实,颗粒间相互作用力越强,土颗粒每次移动均会造成土体抗压强度显著衰减。以图1a)为例,循环次数由10增至100,在固结围压分别为100、200、300 kPa下,试件的破坏动应力比加载前分别减小15.73%、16.94%、18.38%,固结围压与循环应力退化正相关,固结围压增大,土体的抗压强度减小。

2.2 不同加载频率下试件的动应力分析

不同加载频率 f 下,试件的动应力随循环次数的变化关系曲线(σ_d-N)如图2所示。

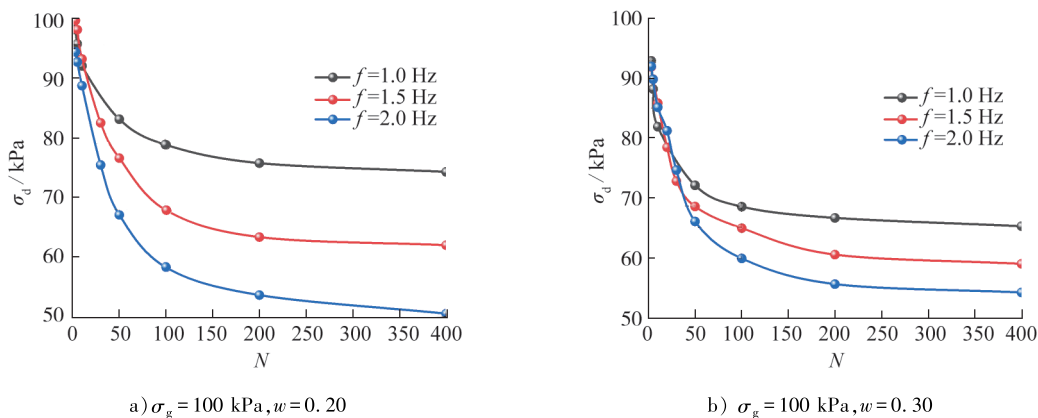


图2 不同加载频率下试件的动应力随循环次数的变化关系曲线

由图2可知:不同加载频率、循环应力比下,试件的动应力均随循环次数的增大先快速减小后缓慢减小,循环次数超过100后,动应力衰减明显变慢,超过200后,动应力趋于稳定;相同循环次数下, σ_d-N 关

系曲线的切线斜率随加载频率的增大而减小;相同加载频率下, σ_d-N 关系曲线的斜率随循环次数的增大而增大;相同循环次数下,随加载频率增大,动应力减小。以图2a)为例,循环次数由10增至100时,加载频率分别为1.0、1.5、2.0 Hz的试件破坏动应力比加载前分别减小22.55%、31.70%、37.10%,施加相同的轴向应力,一定循环次数下,试件所受加载频率越大,动应力衰减幅度越大,动强度越小。故在一定固结围压和循环应力比条件下,试件所受动荷载加载频率越大,达到破坏时所需加载次数越少。

2.3 不同循环应力比下试件的动应力分析

不同循环应力比下试件的动应力随循环次数的变化关系曲线(σ_d-N)如图3所示。

由图3可知:不同循环应力比下,试件的动应力随循环次数的增大均先快速减小后缓慢减小,并趋于稳定;相同循环次数下,随循环应力比增大,动应力减小,循环次数由10增至100,循环应力比分别为0.20、0.25、0.30时,对应的动应力比加载前分别减小20.4%、22.5%、26.08%,说明循环应力比越大,动应力衰减越明显,原因是循环应力比越大,颗粒相对位置的移动和土颗粒的破碎越剧烈,动应力减幅越大;土体动强度随循环次数的增大而减小,土体破坏所需循环次数随循环应力比的增大而减小,与加载频率对动应力的影响一致。

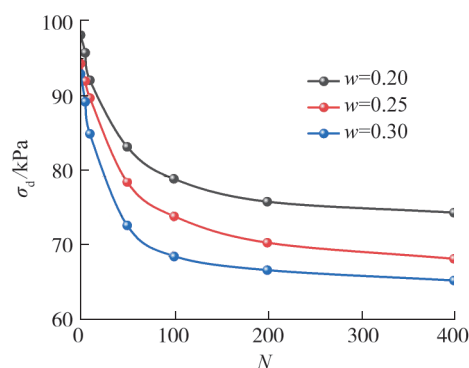


图3 不同循环应力比下试件的 σ_d-N 关系曲线

对比图2、3可知:随加载频率和循环应力比的增大,试件的动强度急剧减小,曲线从陡峭变平缓,与横轴趋于平行。试件的变形行为取决于能量积累,随能量的不断积累,应变增大,抗压强度减小,随后达到相对稳定的状态。加载频率较大时,试件循环消耗的能量较少;加载频率越大,试件达到稳定状态所需循环次数越多。试件受压应力作用,内部土颗粒会移动、破碎;循环应力比越大,颗粒相对位置的移动和土颗粒的破碎越剧烈,此时动应力大幅减小,土体动强度衰减越明显。不同固结围压、不同加载频率、不同循环应力比条件下,试件的动应力-循环次数关系曲线均表现为非线性,且存在拐点。在动荷载作用下,土颗粒相对移动并重新排列组合,破坏了黏土颗粒间的相互作用力,使土体结构性减弱,土体动强度减小。循环100次后,动强度的衰减明显变慢,认为达到临界循环次数,此时土颗粒完全排列重组,颗粒间形成的新联结较弱,即使改变施加土体上的荷载条件,土体动强度很难发生明显变化。

不同循环次数 N 下,固结围压、加载频率、循环应力比与动应力的关系曲线如图4所示。

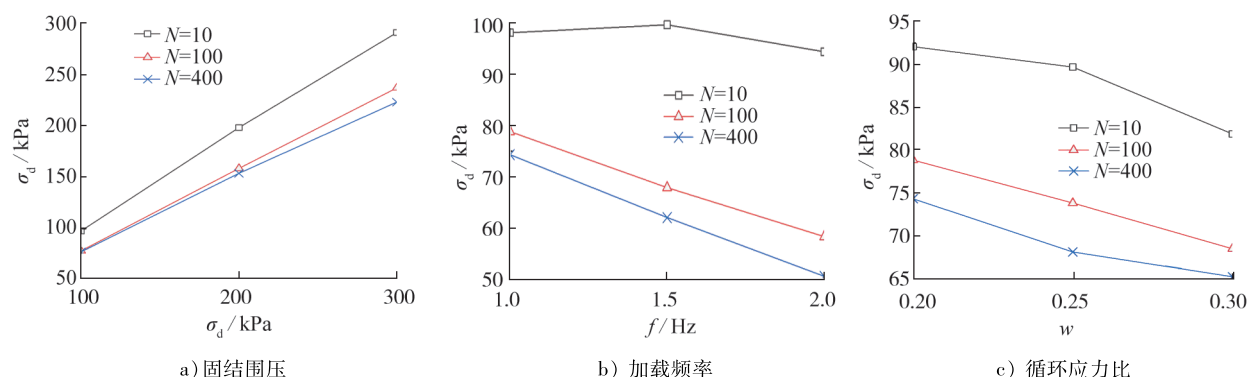


图4 不同循环次数下,固结围压、加载频率、循环应力比与动应力的关系曲线

由图4可知:循环次数相同,动应力水平随固结围压增大而增大,随加载频率、循环应力比增大而减小,固结围压、加载频率、循环应力比对土体动应力作用水平有显著影响;循环次数较小时, σ_d-f 、 σ_d-w 曲线较平缓,循环次数分别为100、400时,动应力与固结围压、加载频率、循环应力比近似呈线性关系,曲线斜率增大。

3 动变形特性研究

3.1 动弹性模量

动弹性模量是动力特性参数,反映土体的动变形特性。选择每级荷载具有代表性的循环试验数据计算动弹性模量,尽可能减小振动次数对动弹性模量的影响。

循环动应力

$$\sigma_d' = (\sigma_{d,\max} - \sigma_{d,\min}) / 2,$$

式中: $\sigma_{d,\max}$ 为最大动剪应力, $\sigma_{d,\min}$ 为最小动剪应力。

动应变

$$\varepsilon_d = (\varepsilon_{d,\max} - \varepsilon_{d,\min}) / 2,$$

式中: $\varepsilon_{d,\max}$ 为最大动应变, $\varepsilon_{d,\min}$ 为最小动应变。

动弹性模量

$$E_d = \sigma_d' / \varepsilon_d \quad (1)$$

3.1.1 固结围压对动弹性模量的影响

根据式(1)计算动弹性模量,绘制不同固结围压下试件的动弹性模量随动应变变化的散点图,如图 5 所示。由图 5 可知:不同固结围压下,试件的动弹性模量均随动应变的增大先快速减小后缓慢减小;固结围压越大,动弹性模量越大,原因是随固结围压的增大,土颗粒间间距减小,摩擦力增大,土体固结后密实性增大,抵抗变形的刚度增大;当 $\varepsilon_d > 0.20\%$ 时,土体在固结围压 200、300 kPa 下的动弹性模量数据较集中,即应变较大时,动弹性模量差异性较小。固结围压对土体的动弹性模量有影响,增大固结围压能提高土体抗变形能力。

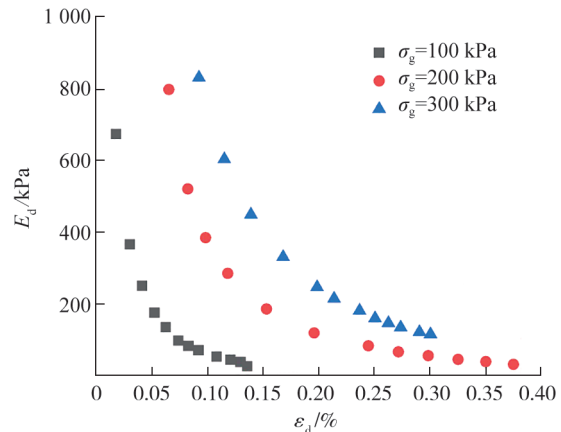


图 5 不同围压条件下试件的动弹性模量随应变变化散点图

3.1.2 加载频率对动弹性模量的影响

不同加载频率下试件的动弹性模量随动应变变化的散点图如图 6 所示。由图 6 可知:不同加载频率下,试件的动弹性模量随动应变的增大先快速减小后缓慢减小;小应变阶段动弹性模量迅速衰减,应变累积到 0.40% 后,动弹性模量变化速率减慢,最后趋于稳定;动应变相同时,加载频率越大,动弹性模量越大,原因是在动荷载作用下,土颗粒调整排列顺序(即改变土体结构)后发生土体变形,但调整需要一定时间,土颗粒在较短时间内不能充分移动,土体表现出更高的抵抗变形能力;黏性土的孔隙较小,在动荷载作用下表现出较强的速率效应;在相同动荷载作用下,加载频率越大,试件越不易破坏。

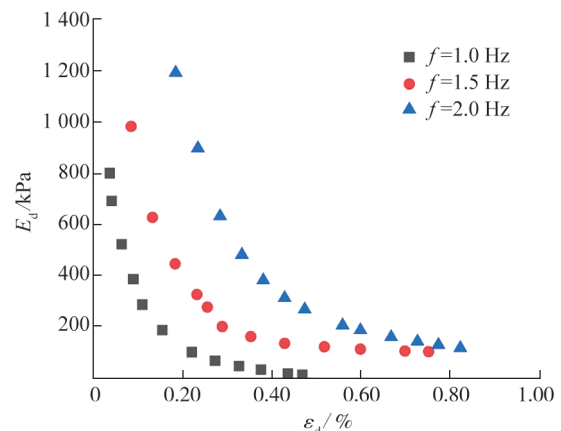


图 6 不同加载频率下试件的动弹性模量随应变变化散点图

3.1.3 循环应力比对动弹性模量的影响

不同循环应力比条件下试件的动弹性模量随动应变变化的散点图如图 7 所示。由图 7 可知:不同循环应力比下,动弹性模量随动应变的增大先快速减小后缓慢减小,循环应力比越大,减小速率越快;相同应变下,动弹性模量随循环应力比的增大而减小;在 $0 < \varepsilon_d < 0.10\%$ 时,不同循环应力比下,动弹性模量差

异较大,随动应变的增大变化较大;在 $\varepsilon_d \geq 0.10\%$ 时,不同循环应力比下,动弹性模量差异较小,随动应变增大变化较慢。不同循环应力比条件下,随应变的增大,动弹性模量的差异性减小。不超过一定动应变时,循环应力比对试件的动弹性模量影响更显著。

不同固结围压、不同加载频率、不同循环应力比下,试件的动弹性模量与动应变的关系曲线的发展趋势相同,试件的动弹性模量随动应变的增大先快速减小后趋于稳定。试件的动应变进一步增大时,土体内部骨架结构发生较大不可恢复的变形,动弹性模量趋于某一定值。

3.1.4 线性拟合分析

不同固结围压、加载频率、循环应力比条件下,动弹性模量的倒数 $1/E_d$ 随动应变 ε_d 变化的散点图如图8所示。

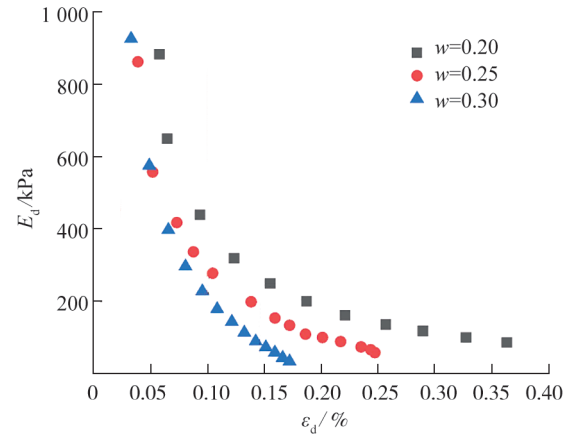


图7 不同循环应力比下试件的动弹性模量随应变变化散点图

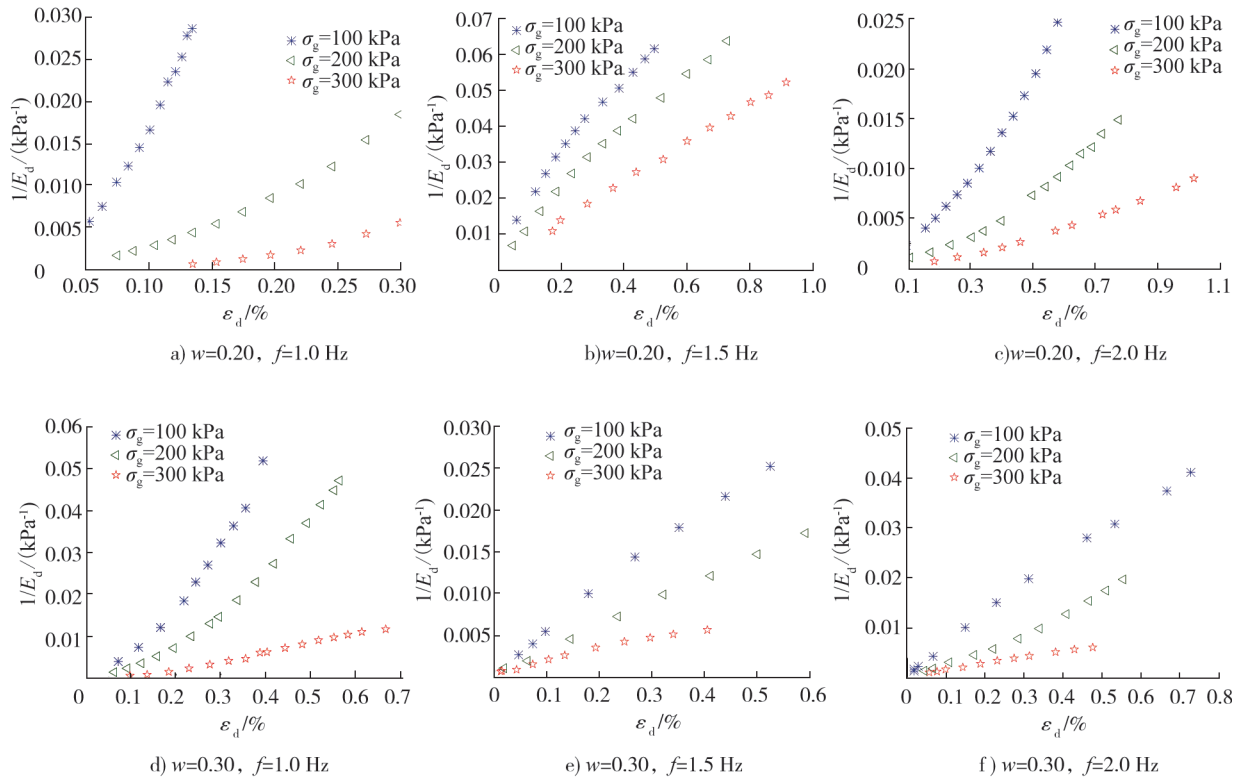


图8 不同固结围压、加载频率、循环应力比条件下, $1/E_d$ 随 ε_d 变化的散点图

由图8可知:不同固结围压、加载频率、循环应力比下, $1/E_d$ 与 ε_d 近似呈线性分布。选择直线方程描述 $1/E_d$ 与 ε_d 的变化规律,直线方程为:

$$1/\{E_d\} = a + b\varepsilon_d, \quad (2)$$

式中: a 为截距, b 为斜率, $\{E_d\}$ 为以kPa为单位的 E_d 的数值。

观察参数 a 和 b 的变化,随固结围压的增大, b 减小;固结围压、加载频率对 a 的影响无明显规律。采用 $E_d = \sigma_d/\varepsilon_d$,式(2)转化为:

$$\varepsilon_d/\{\sigma_d\} = a + b\varepsilon_d, \quad (3)$$

式中 $\{\sigma_d\}$ 为以kPa为单位的 σ_d 的数值。

式(3)表示的 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 关系曲线为 R. L. Kondor 双曲线^[18],将公式整理变形得:

$$\{\sigma_d\}=\varepsilon_d/(a+b\varepsilon_d)。$$

拟合图 8 中不同条件下 $1/E_d-\varepsilon_d$ 关系曲线,判断 $E_d-\varepsilon_d$ 的相关性,相应条件下的拟合参数 a 、 b 如表 2 所示。各曲线决定系数 R^2 均大于 0.960 00,拟合效果良好, $1/E_d-\varepsilon_d$ 关系的线性相关性较好,表明可采用 R. L. Kondor 双曲线模型拟合重塑结构红黏土动本构关系。

表 2 不同循环应力比、加载频率、固结围压下参数 a 、 b 拟合结果

w	f/Hz	σ_g/kPa	a	b	R^2
0.20	1.0	100	-0.005 92	0.243 11	0.967 57
		200	-0.003 98	0.068 35	0.972 85
		300	-0.003 79	0.029 26	0.965 18
	1.5	100	0.011 10	0.010 49	0.986 91
		200	0.000 61	0.008 15	0.990 70
		300	0.000 27	0.005 44	0.998 29
	2.0	100	-0.003 13	0.045 13	0.968 49
		200	-0.001 17	0.017 68	0.975 85
		300	-0.001 50	0.009 59	0.988 60
0.30	1.0	100	-0.010 28	0.144 84	0.970 61
		200	-0.009 38	0.093 55	0.967 91
		300	-0.002 00	0.020 81	0.989 79
	1.5	100	0.001 06	0.047 19	0.996 48
		200	0.000 51	0.028 45	0.999 20
		300	0.000 78	0.012 88	0.981 02
	2.0	100	-0.000 76	0.029 72	0.995 78
		200	-0.000 96	0.029 49	0.983 68
		300	0.000 79	0.012 47	0.984 46

3.2 阻尼比

阻尼比是土体动力特性的重要参数之一,反映在循环荷载作用下土体发生形变时,内部土颗粒因克服阻力作用而造成的能量损失。滞回曲线围成面积代表能量消耗程度,而阻尼比反映土的黏滞性,采用滞回曲线围成的面积衡量阻尼比,如图 9 所示。

阻尼比

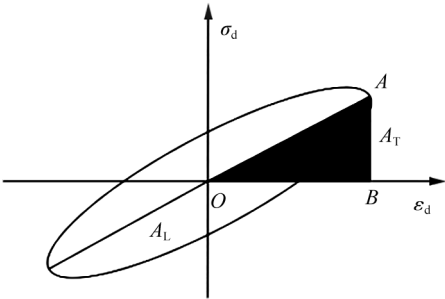
$$\lambda=A_T/(4\pi A_L)。$$

(4)

3.2.1 固结围压对阻尼比的影响

根据式(4)计算阻尼比,绘制不同固结围压, $w=0.2$, $f=1.0\text{ Hz}$ 时,阻尼比随动应变变化的散点图及拟合曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知:1)相同固结围压下,阻尼比随动应变的增大而增大;相同应变增量下,固结围压越小对阻尼影响越明显。2)由于土体受围压作用被压密实,存在极限稳定状态;再增大围压,土体结构也很难发生较大变化,能量损耗无明显波动。3)固结围压为 100 kPa 时,阻尼比在小应变($\varepsilon_d<0.40\%$)阶段保持稳定的增大趋势;固结围压为 200 kPa 时,阻尼比在 $\varepsilon_d>0.65\%$ 阶段仍持续增大。4)固结围压为 300 kPa 时,阻尼比在小应变($\varepsilon_d<0.30\%$)阶段保持稳定的增大趋势。5)土体应变增量相同,固结围压增大,土体内部能量消耗减弱。



A_T —阴影三角形面积; A_L —滞回圈面积;
 A —长轴与曲线交点; B —过 A 与横轴垂线交点。

图 9 滞回曲线的特征

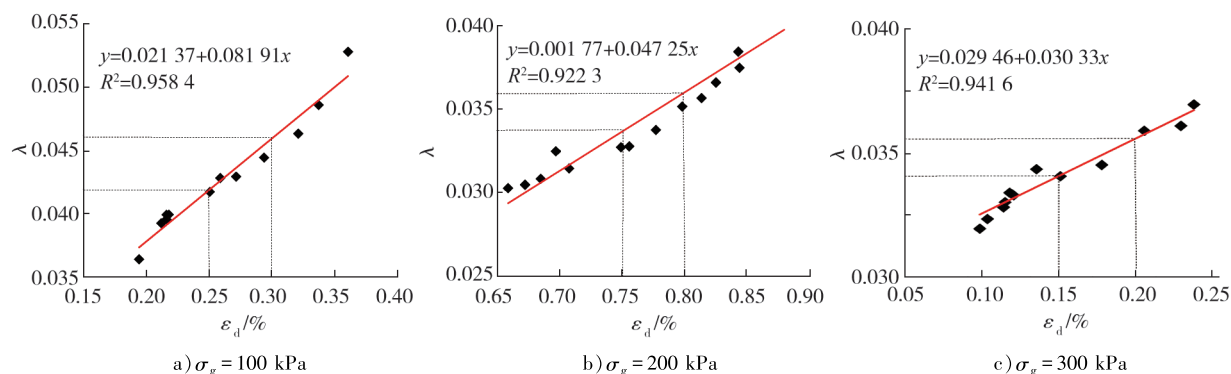


图 10 不同固结围压下, $w = 0.2$, $f = 1.0$ Hz 时, 阻尼比随动应变变化的散点图及拟合曲线

3.2.2 循环应力比对阻尼比的影响

不同循环应力比下, $\sigma_g = 100$ kPa, $f = 1.5$ Hz 时, 阻尼比随动应变变化的散点图及拟合曲线如图 11 所示。

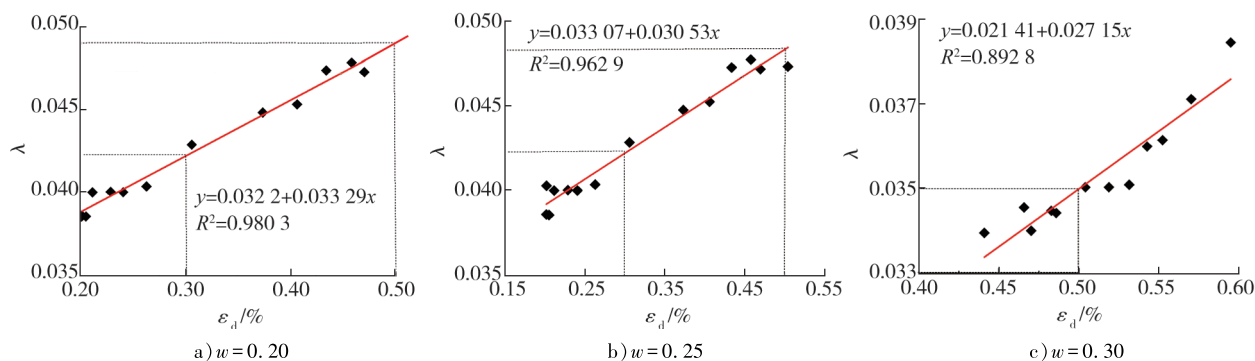


图 11 不同循环应力比下, $\sigma_g = 100$ kPa, $f = 1.5$ Hz 时, 阻尼比随动应变变化的散点图及拟合曲线

由图 11 可知: 1) 动应变相同时, 阻尼比随循环应力比的增大先基本不变后减小。2) 动应变为 0.30%, 图 11a)、b) 对应阻尼比均约为 0.042; 动应变为 0.50% 时, 图 11a)、b) 对应的阻尼比均约为 0.048。3) 循环应力比分别为 0.20、0.25, 阻尼比随动应变的增大而小幅增大, 且增幅相近, 即循环应力比变化对阻尼比无影响。4) 循环应力比分别为 0.25、0.30, 动应变为 0.50% 时, 对应阻尼比分别为 0.048、0.035, 土体所受循环应力比增大, 阻尼比减小, 原因是土体变形时需消耗能量, 循环应力比越小, 作用在土体上的动应力在土体内产生的能量损耗越大, 故在相同动应变条件下, 阻尼比随循环应力比的增大而减小。

3.2.3 加载频率对阻尼比的影响

不同加载频率下, $\sigma_g = 100$ kPa, $w = 0.20$ 时, 阻尼比随动应变变化的散点图及拟合曲线如图 12 所示。

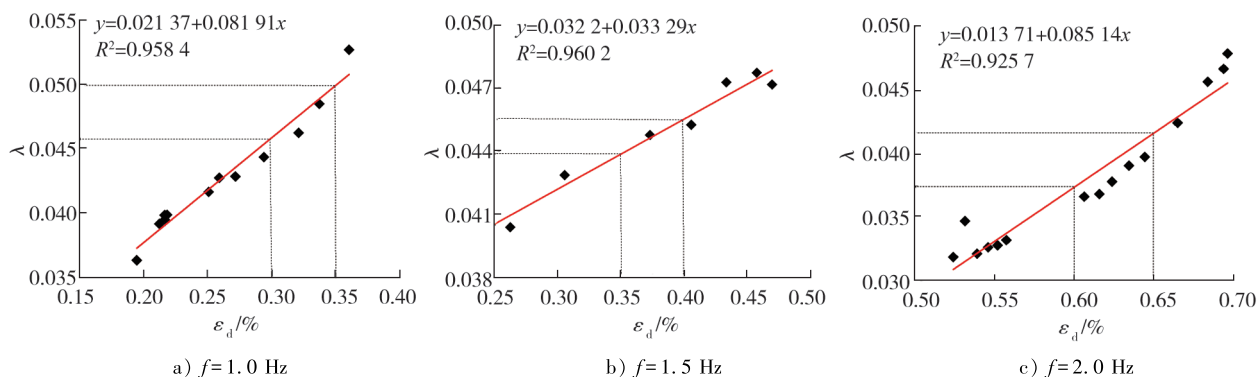


图 12 不同加载频率下, $\sigma_g = 100$ kPa, $w = 0.20$ 时, 阻尼比随动应变变化的散点图及拟合曲线

由图12可知:不同加载频率下, $\sigma_g = 100 \text{ kPa}$, $w = 0.20$ 时,阻尼比随动应变的增大而增大;固结围压和循环应力比相同时,随加载频率的增大,阻尼比明显减小;阻尼比受加载频率影响显著,变化范围为0.030~0.055,变化速率无明显规律;动应变由0.30%增至0.35%,对应的阻尼比减小且减速变慢,原因是加载频率增大时,动应力对土体作用时间变短,应力在土体内损耗的能量减少,阻尼比减小。

4 结论

1)不同固结围压、循环应力比和加载频率条件下,南宁重塑红黏土的动应力随循环次数的变化关系曲线均为非线性,动应力随循环次数的增大而减小;超过临界循环次数后,动荷载作用对土体动强度的影响较小;动应力-循环次数曲线切线斜率随循环次数的增大而增大。动强度衰减程度与循环应力比、加载频率相关。

2)采用R. L. Kondor双曲线模型描述南宁重塑红黏土的循环正弦波荷载作用下的动本构关系,拟合后的动弹性模量的倒数与动应变的关系曲线近似线性相关,随固结围压的增大,曲线斜率减小。

3)在土体发生较大动变形时,土体的动弹性模量对动荷载变化的敏感性下降。土颗粒移动和破碎造成土体受力变形,期间土单元间联结被逐渐破坏,动应变增大,土骨架发生不可逆变形,动弹性模量逐渐减小且变化速率随应变的增大逐渐减小。

4)不同固结围压、循环应力比和加载频率下,阻尼比变化规律基本一致。阻尼比随动应变的增大而增大,加载后土体更密实,土单元间距变小,土颗粒移动时碰撞耗能更大。阻尼比约为0.030~0.055,变化速率无明显规律。阻尼比受固结围压、循环应力比、加载频率影响并在一定范围内波动,加载频率对阻尼比的影响最显著。

参考文献:

- [1] 谢标,吴建奇. 循环荷载作用下红黏土累积变形研究[J]. 地震工程学报,2019,41(6):1623-1629.
- [2] 马飞鹤. 高填方区桩基础塌孔处理实例分析[J]. 工程建设与设计,2023(23):26-28.
- [3] ZHANG Z L, WANG T, WU S R, et al. Dynamics characteristic of red clay in a deep-seated landslide, Northwest China: an experiment study[J]. Engineering Geology,2018,239:254-268.
- [4] 彭木文,左双英,杨国生,等. 循环加卸载作用下贵阳红黏土损伤特性试验研究[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1466-1476.
- [5] 田琦,陈国焜,王伟,等. 福建沿海原状软土力学特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(5):78-84.
- [6] 陈成,周正明,张先伟,等. 循环荷载作用下泥炭质土动力累积特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(5):1247-1255.
- [7] 龙尧,张家生,丁建源,等. 粗粒土路基循环荷载试验及累积变形模型研究[J]. 振动与冲击,2017,36(16):128-133.
- [8] LIU H L, WANG C M, LIU X Y, et al. Deformation characteristics and prediction of unbound volcanic ash pavement based on the mechanistic-empirical design guide[J]. Construction and Building Materials,2022,327:126975.
- [9] 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.
- [10] LEI H Y, LI B, LU H B, et al. Dynamic deformation behavior and cyclic degradation of ultrasoft soil under cyclic loading[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(11):0001641.
- [11] 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.
- [12] 张健,谢渭平,常彦博,等. 循环荷载下黄土孔隙水压力与能量耗散演化[J]. 西安科技大学学报,2023,43(5):863-872.
- [13] 孟晓宇,熊峰,吴堃,等. 循环荷载作用下江西重塑红黏土动力特性试验研究[J]. 科学技术与工程,2018,18(25):84-90.
- [14] 何忠明,王盘盘,张文周,等. 考虑不同单次加载时长影响的循环荷载作用下软土动力特性[J]. 长安大学学报(自然

- 科学版),2023,43(5):30-39.
- [15] 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.
- [16] 张炜,李亚,周松望等. 南海北部区域黏土循环动力特性试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(7):2413-2423.
- [17] 中华人民共和国交通部,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.
- [18] KONDER R L, ASCE A M. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soil[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1963, 89(1): 115-143.

Experimental study on the cyclic dynamic characteristics of red clay in Nanning area

XIAO Guiyuan^{1,2}, LIU Xiaonan^{1*}

1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541000, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Geotechnics, Guilin University of Technology, Guilin 541000, China

Abstract: To study the cyclic dynamic characteristics of red clay in Nanning area, dynamic triaxial cylindrical specimens (hereinafter referred to as specimens) are prepared for a series of dynamic triaxial tests. The effects of different consolidation confining pressures, cyclic stress ratios, and loading frequencies on the dynamic strength degradation and dynamic deformation evolution characteristics of Nanning red clay are investigated, along with an analysis of the variation patterns of dynamic elastic modulus and damping ratio. The test results indicate that: 1) Under different loading conditions (consolidation confining pressure, loading frequency, cyclic stress ratio), the dynamic stress of the specimens decreases rapidly and then tends to stabilize with the increase of the number of cycles. For the same number of cycles, dynamic stress increases with the increase of consolidation confining pressure, while it decreases with the increase of loading frequency and cyclic stress ratio, indicating that consolidation confining pressure, loading frequency, and cyclic stress ratio have a significant impact on the dynamic stress of the specimens. 2) Under a consolidation confining pressure of 300 kPa and a loading frequency of 1.0 Hz, the compressive strength of the specimens reaches its maximum; furthermore, after a certain number of loading cycles, the sensitivity of compressive strength to loading conditions decreases. 3) Consolidation confining pressure, cyclic stress ratio, and loading frequency all influence the dynamic elastic modulus of the specimens, which is characterized by a decrease in dynamic elastic modulus and a slowing rate of decrease with the accumulation of dynamic strain; for the same dynamic strain, the dynamic elastic modulus increases with the increase of consolidation confining pressure and loading frequency, while it decreases with the increase of cyclic stress ratio; under different conditions of consolidation confining pressure, loading frequency, and cyclic stress ratio, the inverse of the dynamic elastic modulus is approximately linearly correlated with dynamic strain. 4) When the increment of dynamic strain is the same, the change in damping ratio decreases with the increase of consolidation confining pressure; it remains relatively constant and then decreases with the increase of cyclic stress ratio; and it decreases with the increase of loading frequency; the damping ratio fluctuates within a certain range and increases with the increase of dynamic strain.

Keywords: red clay; dynamic triaxial test; dynamic modulus of elasticity; damping ratio; dynamic strain

(责任编辑:王惠)