

DOI: 10.11779/CJGE201409012

# 应力历史对重塑红黏土动力特性影响的试验研究

李 剑, 陈善雄, 姜领发, 熊署丹

(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:** 土体动力特性是影响工程稳定性的重要因素。大量试验研究表明应力历史对红黏土静力特性有较显著影响, 但目前研究应力历史对红黏土动力特性影响的成果甚少。为进一步揭示应力历史对红黏土动力特性的影响, 对承受过不同应力历史的重塑红黏土土样进行了大量动三轴试验, 得到了不同应力历史条件下重塑红黏土的动应力应变骨干曲线及动模量变化曲线, 分析了不同应力历史对重塑红黏土的影响规律。试验结果表明: 在不超过重塑红黏土强度的范围内, 提高土体压实度、围压、固结比和振动频率, 有利于提高土体动强度和动弹性模量。为给相关工程提供基础数据及参考, 建立了重塑红黏土动力指标与应力历史因素的经验公式。

**关键词:** 重塑红黏土; 应力历史; 动三轴试验; 动力特性; 动强度; 动弹性模量

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)09-1657-09

作者简介: 李 剑(1983-), 男, 助理研究员, 主要从事土体本构及工程稳定性理论研究。E-mail: lijianwelcome@163.com。

## Experimental study on influence of stress history on dynamic properties of remolded red clay

LI Jian, CHEN Shan-xiong, JIANG Ling-fa, XIONG Shu-dan

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

**Abstract:** The dynamic characteristics of soils are important factors affecting the engineering stability. Experimental studies have shown that the stress history has a more significant impact on the static characteristics of the red clay. However, there are few research achievements from the studies on the influence of the stress history on the dynamic properties of the red clay. In order to further reveal the effect of the stress history on the dynamic characteristics of the red clay, a large number of dynamic triaxial tests are performed on the remolded red clay samples with different stress histories. The dynamic stress-strain bone curve and the dynamic modulus variation curve of the remolded red clay under different stress histories are obtained. The influence laws of the stress history on the remolded red clay are analyzed. The test results show that in the range not exceeding the strength of the red clay, improving the soil compactness, confining pressure, consolidation ratio and vibration frequency is beneficial to enhancing the dynamic strength and elastic modulus of the soils. In order to provide basic data and references for the relevant projects, several empirical equations for the dynamic indexes and stress history factors of red clay are established.

**Key words:** remolded red clay; stress history; dynamic triaxial test; dynamic characteristic; dynamic strength; dynamic elastic modulus

## 0 引言

红黏土作为一种特殊土, 广泛分布于中国的西南和中南地区<sup>[1]</sup>, 大量交通工程不可避免要通过红黏土分布地域, 对其力学特性的研究具有较强的实际意义和工程应用价值。大量学者对红黏土地基进行了大量原位力学试验, 研究结果表明, 红黏土地基的承载力和变形模量变化较大, 其力学性质与含水率、颗粒组成、赋存条件以及土体内部结构、裂隙等因素有很大关系<sup>[2-6]</sup>, 而这些性质往往严重影响其作为路基填料的安全性和适用性<sup>[1,7]</sup>。

工程上要克服原状红黏土的不良工程特性, 往往对其采用重塑的手段。目前对重塑红黏土的静力特性已研究较多, 大量研究表明, 通过对红黏土的重塑, 可以剔除其裂隙性、分布不均匀性等不良地质因素, 增加土颗粒间摩擦力和咬合力, 提高其承载变形的能力<sup>[8-10]</sup>。近年来, 一些学者开始关注应力历史对重塑红黏土力学特性影响的研究。如康景文等<sup>[7]</sup>对昆明新

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-02); 湖北省自然科学基金项目(2011CDA124)

收稿日期: 2013-11-11

机场红黏土地基进行了冲压处理实验研究,结果表明,受冲压后的红黏土地基承载力明显提高。聂庆科等<sup>[11]</sup>研究了冲击荷载作用后重塑红黏土的变形和强度特性,结果表明,土体强度随冲击次数的增加而升高,尤其是在提高围压的情况下,效果更为明显。李佩佩<sup>[12]</sup>对广西某地红黏土的冲击三轴试验也得到相类似的结论。上述研究成果表明,适当地承受某些应力历史有利于提高重塑红黏土的承载变形能力,因此,研究应力历史对重塑红黏土力学特性的影响具有较强的实用价值。

对于交通工程来讲,岩土体的动力特性是关系到工程稳定性的关键所在。目前,对重塑红黏土力学特性的研究多集中于对其静力特性的研究,对于其动力特性的研究仍然甚少,特别是应力历史对重塑红黏土动力特性的研究更为少见。

本文对经受过不同应力历史的重塑红黏土土样进行了大量动三轴试验,重点研究了不同应力历史对重塑红黏土动力特性的影响规律,同时还研究了其他影响重塑红黏土动力特性的因素。研究成果具有一定的学术价值和工程应用的价值。

## 1 重塑红黏土动三轴试验

### 1.1 动三轴试验仪器简介

本次动三轴试验仪器采用 SDT-10 型微机控制电液伺服动态三轴测试系统(见图 1)。该仪器系统由一台微机控制电液伺服动态三轴测试系统主机、一个标准型三轴压力室、一套侧向施加围压电液伺服激振器、一套全数字多通道电液伺服控制系统、一台液压源和一台 PC 机组成。



图 1 SDT-10 型动态三轴测试系统

Fig. 1 SDT-10 dynamic triaxial test system

该试验系统可提供最大轴向激振动态负荷 10 kN; 三轴压力室可承受最大围压 1 MPa; 仪器变形传感器精度优于 0.5%, 应变测量精度可达  $10^{-4}$ ; 试验试

样尺寸  $\Phi 39.1 \times 80$  mm; 可提供轴向侧向激振频率为 0~5 Hz; 试验波形可提供正弦波、三角波、方波、梯形波等,也可自定义波形; 试验控制方式可选择应力控制或应变控制。

### 1.2 试验土样及其基本物理参数

试验所用土样选自武汉至咸宁城际铁路试验段周边,试验土体为重塑土。为研究红黏土的工程特性以及确定试验参数,进行了颗粒分析、液塑限及击实等室内物理特性试验。

颗粒分析试验结果: 本文所研究的红黏土的粒径均小于 0.075, 属细粒土, 土体比重 2.7, 试验结果见表 1。

表 1 颗粒分析试验结果

Table 1 Results of particle analysis

粒径/mm	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
含量/%		57.4	42.6	

注: $<0.05$  mm 颗粒含量为 90.7%, $<0.01$  mm 颗粒含量为 52.7%, $<0.002$  mm 颗粒含量为 29.6%。

液塑限试验结果: 试验土样液限为 45%, 塑限为 20.9%, 塑性指数 23.1。液塑限分析可知, 该种红黏土具有较高的塑性指数, 说明该种红黏土颗粒较细, 土体中黏粒含量较高, 这与颗粒分析试验结果相对应。根据《铁道工程土工试验规程》, 可判定该红黏土为高液限黏土。

击实试验结果表明, 试验土样最优含水率为 20%, 最大干密度为  $1.616 \text{ g/cm}^3$ 。试验结果见图 2。

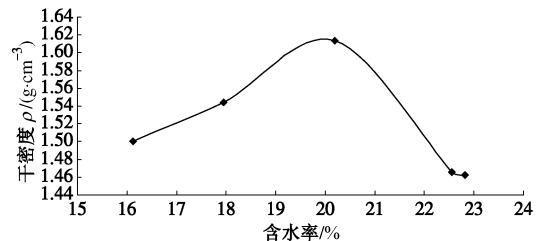


图 2 含水率与干密度关系曲线

Fig. 2 Relationship between moisture content and dry density

### 1.3 试验方案

为全面分析不同应力历史条件下,重塑红黏土动强度和动模量随动剪应变发展的变化规律,本次试验采用了逐级递增循环荷载的试验方式。首先对重塑红黏土试样施加不同的应力历史,而后分级递增施加短时循环荷载,监测土样受不同应力历史后的动态力学特性。试验采用应力控制的方式。

试验中考虑了压实度、围压、固结比和振动频率等 4 个因素。试验方案的确定主要应从以下几个角度

考虑:

### (1) 循环荷载的形式

试验波形的选择主要应与实际情况下的波形尽量相似。根据实测资料表明, 实际列车运行过程中路基中的波形是不规则的正弦波<sup>[13-14]</sup>, 拉应力部分相对于压应力部分的量值较小, 这与半正弦波是有较大差距的。故本次试验选用正弦波形的荷载形式。

### (2) 振动频率的选择

对于高速铁路, 大量研究认为列车振动荷载以低频荷载为主, 频率一般在 10 Hz 以内<sup>[15-16]</sup>。另外, 列车车速与其荷载频率有关<sup>[17]</sup>, 车速越高, 荷载频率越高。因此, 为研究不同车速条件下, 振动频率对于重塑红黏土动力特性的影响, 本次试验选用了 1, 2, 5 Hz 的振动频率。

### (3) 压实度

压实度对于土体力学特性的影响较大。对于施工而言, 往往由于各种原因, 压实度可能达不到要求, 因此, 研究压实度条件下土体动力特性具有较强意义。另一方面, 对于循环荷载试验, 要求所施加的动应力幅值不能超过轴向固结压力, 因此, 需要降低土体压实度以得到较精确数据。故本次试验以压实度为 0.80 的重塑土为主要研究对象, 并研究了其他不同压实度条件下土体的动力特性, 以期获得压实度对重塑红黏土动力特性的影响规律。

### (4) 固结比

由于重塑红黏土强度较高, 为研究其循环荷载条件下的动强度, 需要提高土体的初始固结比, 通过研究固结比条件对土体动强度的影响规律, 可得到不同固结比条件下土体动强度的变化。故本次试验主要以固结比为 3.0 的试验条件为主, 同时研究了其他固结比对土体动强度的影响, 可得到动强度与固结比之间的关系。

### (5) 围压

动应力在 0~5 m 的范围内, 特别是 0~2 m 的范围内衰减很快已被大量原位激振试验和模型试验所证明<sup>[14, 17-18]</sup>, 故这个范围是动应力作用的主要范围。因此, 本次循环荷载试验选用了 25, 50, 100 kPa 作为试验的固结围压。

### (6) 含水率

对于重塑土, 改善其力学特性最直接的方式即为改变其含水率并压实。因此, 本次试验主要研究最优含水率条件下, 土样的力学特性。

具体试验方案如表 2 所示。

对于分级短时循环荷载试验, 需要确定每级荷载的振动次数, 通常采用 2~10 次振动。不采用 1 次振动即施加下级振动是因为土体在动荷载作用下应变具

有滞后性, 1 次振动后土体变形来不及发展即进行下级振动影响试验结果。此外, 考虑到上一级荷载振动结束后土体受惯性作用仍然存在自由振动, 为消除上一级荷载对下一级荷载作用的影响, 每级荷载的振动次数也应大于 1 次。另一方面, 每级荷载振动的次数不宜过多, 主要是由于在循环动荷载作用下, 土体可能发生软化现象(如图 3 所示), 每级荷载振动次数过多, 土样将发生相对较大的应变同样影响试验结果<sup>[19]</sup>。综上分析, 本次分级短时循环荷载试验每级荷载振次次数为 4 次。处理数据时, 选用第 3 级荷载的应力和应变值作为每级荷载的试验值。

表 2 短时动三轴试验方案

Table 2 Programs of short-time dynamic triaxial tests

试验编号	影响因素			
	压实度	围压	固结比	振动频率/Hz
DT1-1	0.80			
DT1-2	0.85	50	3.0	1
DT1-3	0.95			
DT2-1		25		
DT2-2	0.8	50	3.0	1
DT2-3		100		
DT3-1			1.0	
DT3-2	0.8	50	2.0	1
DT3-3			3.0	
DT4-1				1
DT4-2	0.8	50	3.0	2
DT4-3				3

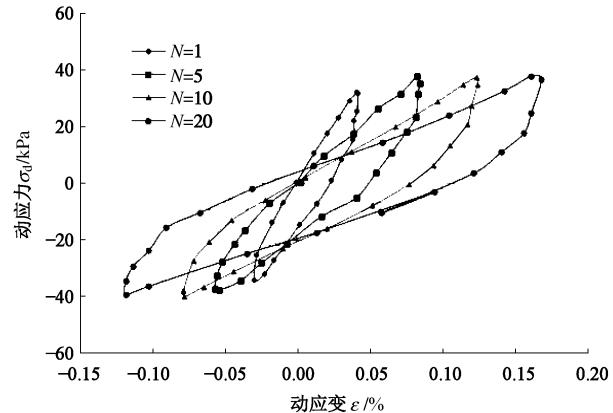


图 3 循环荷载作用下土体应力应变关系

Fig. 3 Relationship between stress and strain of soils under cyclic load

### 1.4 土样制备及加载方法

为保证试验数据的可靠性, 试验严格按照《土工试验规程》进行。试验要点是: ①制样: 保证所制试样条件的一致性。试样的制备均采用统一制法。②施加应力历史: 动荷载施加前, 按照试验计划对土样施加不同围压和偏压, 待土样变形达到条件: 轴向变形 5 min 内不大于 0.005 mm。③分级加载: 在不排水条件下逐级加大动应力幅值进行振动试验。每级荷载振动 4 次后立即进行下级荷载, 荷载形式如图 4 所示。

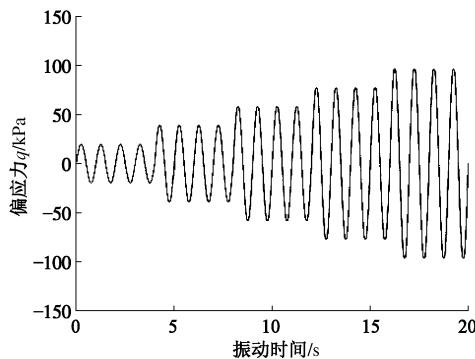


图 4 分级短时动三轴试验荷载波形示意图

Fig. 4 Load waveform of grading short-time dynamic triaxial tests

## 2 试验结果与分析

### 2.1 分级短时循环荷载试验曲线

#### (1) 动强度试验曲线

通过整理试验数据, 可以得到不同应力历史条件下, 土体动应力应变的骨干曲线, 如图 5~8 所示。

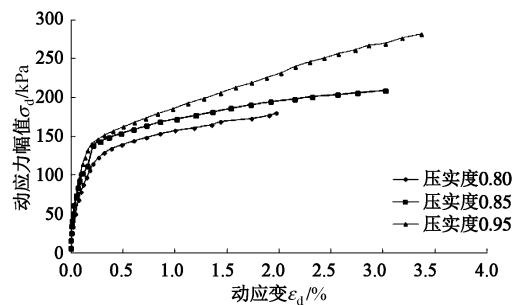
图 5 重塑红黏土  $\sigma_d - \varepsilon_d$  试验曲线(压实度影响)

Fig. 5  $\sigma_d - \varepsilon_d$  test curves of remolded red clay (influenced by compactness)

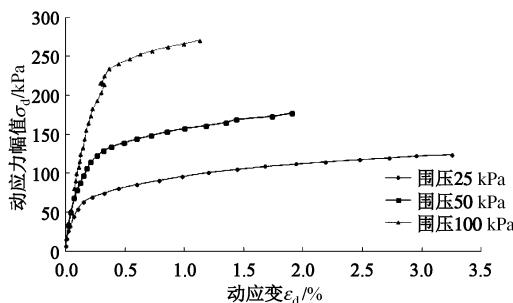
图 6 重塑红黏土  $\sigma_d - \varepsilon_d$  试验曲线(围压影响)

Fig. 6  $\sigma_d - \varepsilon_d$  test curves of remolded red clay (influenced by confining pressure)

由图 5~8 可知, 分级循环荷载条件下, 重塑红黏土  $\sigma_d - \varepsilon_d$  试验曲线呈非线性变化, 土体动应力随动应变的增加而非线性增加。在动应变较小时, 动应力增加较快, 随着动应变的进一步增加 ( $\varepsilon_d > 0.5\%$ ), 动应力的增加幅度逐渐减小, 曲线逐渐趋于平缓, 说明此

时土体已经进入塑性变形阶段, 即将破坏。

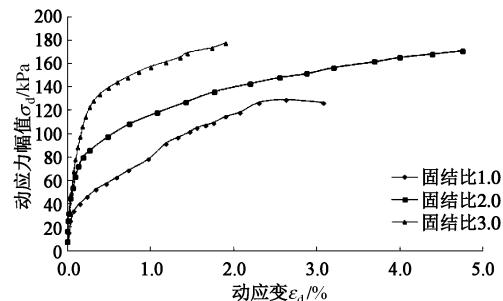
图 7 重塑红黏土  $\sigma_d - \varepsilon_d$  试验曲线(固结比影响)

Fig. 7  $\sigma_d - \varepsilon_d$  test curves of remolded red clay (influenced by consolidation ratio)

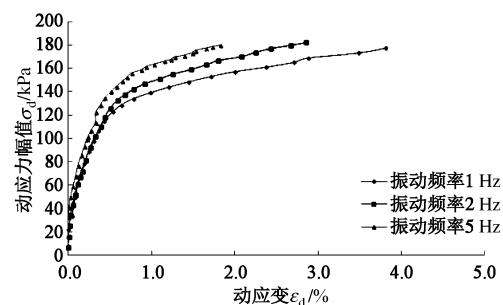
图 8 重塑红黏土  $\sigma_d - \varepsilon_d$  试验曲线(振动频率影响)

Fig. 8  $\sigma_d - \varepsilon_d$  test curves of remolded red clay (influenced by vibration frequency)

另外, 可以看出, 土体所受的应力历史对土体动应力应变曲线有影响。提高压实度、围压、固结比和振动频率有利于提高土体抵抗变形的能力及强度, 图中表现为动应力应变曲线更陡、更高。

#### (2) 动模量试验曲线

图 9~12 分别给出了, 整理后的重塑红黏土动弹性模量的衰减曲线。

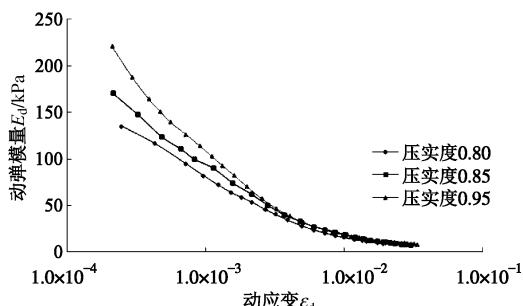


图 9 重塑红黏土动模量试验曲线(压实度影响)

Fig. 9 Dynamic elastic modulus test curves of remolded red clay (influenced by compactness)

分析图 9~12 可知, 土体动弹性模量  $E_d$  随动应变  $\varepsilon_d$  的增大而呈非线性衰减的规律, 不同的试验条件下, 衰减的趋势和规律大致相同, 仅衰减的量值有所

不同。当  $\varepsilon_d$  ( $<1\%$ ) 相对较小时, 动弹模随动应变  $\varepsilon_d$  的增大而衰减较快; 随着动应变  $\varepsilon_d$  的增大, 动弹模的衰减速率不断降低。当  $\varepsilon_d > 1\%$  后, 动弹模的衰减基本趋于稳定。

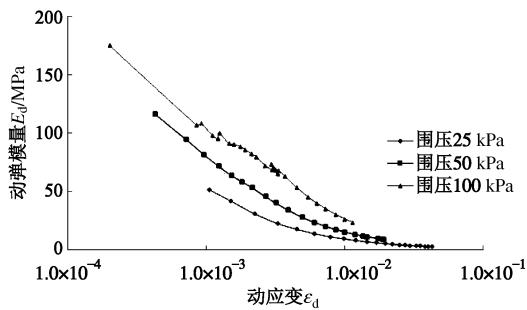


图 10 重塑红黏土动模量试验曲线(围压影响)

Fig. 10 Dynamic elastic modulus test curves of remolded red clay (influenced by confining pressure)

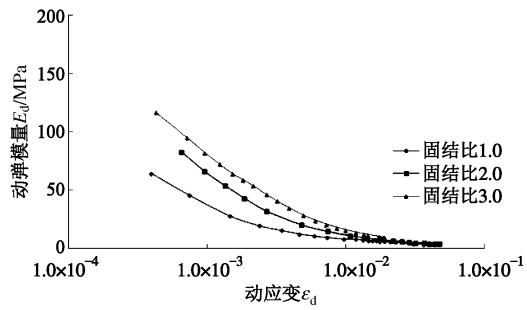


图 11 重塑红黏土动模量试验曲线(固结比影响)

Fig. 11 Dynamic elastic modulus test curves of remolded red clay (influenced by consolidation ratio)

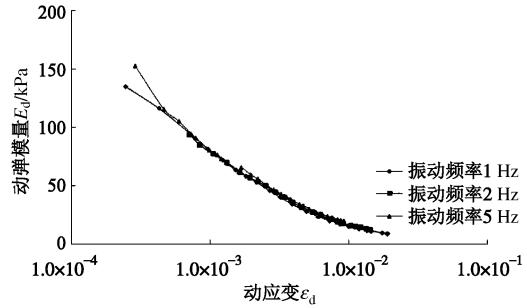


图 12 重塑红黏土动模量试验曲线(振动频率影响)

Fig. 12 Dynamic elastic modulus test curves of remolded red clay (influenced by vibration frequency)

此外, 从图中还可以看出, 在提高压实度、围压、固结比的情况下, 土体动模量是提高的。尽管提高振动频率对于提高土体模量的效果较小, 但其二者的关系仍然是正比关系。这些规律都说明了应力历史对重塑红黏土动模量的影响。

## 2.2 试验结果分析

### (1) 动强度模型分析

由不同应力历史条件下的试验结果可知, 重塑红黏土动应力应变骨干曲线呈双曲线的形态, 这与 Hardin 双曲线模型<sup>[20]</sup>的形式是相同, 即

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d} \quad (1)$$

通过曲线拟合, 可得到模型参数  $a$  和  $b$  的值, 见表 3。拟合曲线与试验数据的相关系数平方达到 0.98 以上, 说明 Hardin 模型可较好地拟合重塑红黏土动应力应变骨干曲线的发展。

得到双曲线模型的参数后, 根据式 (1) 可知, 当  $\varepsilon_d \rightarrow \infty$  时, 可得到重塑红黏土的最大动强度  $(\sigma_d)_u$ , 即  $(\sigma_d)_u = 1/b$ 。但在土的试样中, 如果应力应变曲线没有峰值强度, 则往往是根据一定应变值 (如对于静力三轴试验通常取  $\varepsilon_1 = 15\%$ ) 来确定土体的强度  $(\sigma_d)_f$ ; 对于有峰值的情况, 通常取峰值强度作为土体强度。对于本文所研究的重塑红黏土, 试验曲线中没有峰值的情况, 结合图 5~8 可知, 在动应变较小的情况下, 土体动应力提高较快, 而当动应变超过 0.5% 后, 动应力的提高幅度减缓明显。

表 3 不同应力历史条件下双曲线模型参数

Table 3 Hyperbolic model parameters under different stress histories

压实度	固结比	围压 / kPa	振动频率 / Hz	$a$	$b$	$R^2$
0.80				$7.6 \times 10^{-3}$	5.41	0.99
0.85	3.0	50	1.0	$6.2 \times 10^{-3}$	4.76	0.99
0.95				$9.1 \times 10^{-3}$	3.61	0.98
0.8	1.0	50	1.0	$5.08 \times 10^{-2}$	6.24	0.99
	2.0			$1.33 \times 10^{-2}$	5.96	0.99
0.8	3.0	25	1.0	$2.56 \times 10^{-2}$	7.13	0.99
		100		$6.0 \times 10^{-3}$	3.05	0.98
0.8	3.0	50	2.0	$7.8 \times 10^{-3}$	5.04	0.99
			5.0	$6.6 \times 10^{-3}$	4.91	0.99

为提出合理确定重塑土体动强度的动应变标准, 参照邓肯-张模型理论<sup>[21]</sup>定义应力比为

$$R_r = \frac{(\sigma_d)_r}{(\sigma_d)_u}, \quad (2)$$

式中,  $r$  表示不同动应变水平,  $(\sigma_d)_r$  表示不同动应变所对应的动应力。

表 4 给出了不同试验条件下, 各动应变所对应的应力比。

从表 4 可以看出, 当动应变达到 5% 时, 土体应力比已经超过了 0.9, 绝大多数条件下, 应力比超过了 0.95; 而当动应变达到 10% 时, 应力比达到了 0.97 以上, 且动应变 15% 时的应力比与 10% 的应力比基本相同。这说明当动应变达到 10% 时, 重塑红黏土的动强度几乎已发到了极限动强度。

表 4 不同应力历史条件下的应力比

Table 4 Stress ratios under different stress histories

试验编号	$(\sigma_d)_u/\text{kPa}$	$R_{0.5}$	$R_1$	$R_5$	$R_{10}$	$R_{15}$
DT1-1	184.84	0.78	0.88	0.97	0.99	0.99
DT1-2	210.08	0.79	0.88	0.97	0.99	0.99
DT1-3	277.01	0.66	0.80	0.95	0.98	0.99
DT2-1	140.25	0.58	0.74	0.93	0.97	0.99
DT2-2	184.84	0.78	0.88	0.97	0.99	0.99
DT2-3	323.62	0.72	0.84	0.96	0.98	0.99
DT3-1	142.65	0.52	0.68	0.92	0.96	0.98
DT3-2	167.79	0.69	0.82	0.96	0.98	0.99
DT3-3	184.84	0.78	0.88	0.97	0.99	0.99
DT4-1	184.84	0.78	0.88	0.97	0.99	0.99
DT4-2	198.41	0.76	0.87	0.97	0.98	0.99
DT4-3	203.67	0.79	0.88	0.97	0.99	0.99

因此, 实际应用中, 可取动应变为 5%~10%作为确定动强度的标准。另外, 分析可知, 重塑红黏土对变形具有较强的敏感性, 控制土体变形是保持其工程稳定的重要条件。

## (2) 动模量模型分析

动模量是影响土体在循环荷载作用下变形的重要参数, 研究土体动模量及其变化规律对于研究土体动力特性有重要意义。

由重塑红黏土动模量试验曲线可知, 重塑红黏土动模量的衰减可用改进的 Davidenkov 模型<sup>[22]</sup>较好地描述。改进 Davidenkov 模型如下所示

$$E_d = E_{\max} (1 - f(\varepsilon_d)) = E_{\max} \left( 1 - \left( \frac{(\varepsilon_d / \varepsilon_{\text{ref}})^{2B}}{1 + (\varepsilon_d / \varepsilon_{\text{ref}})^{2B}} \right)^A \right) \quad (3)$$

根据土体骨干曲线及式(1)可得到重塑红黏土最大动弹性模量  $E_{\max}$ , 即

$$E_{\max} = 1/a \quad (4)$$

根据土体动强度  $(\sigma_d)_u$  和最大动弹性模量  $E_{\max}$ , 即可得到参考动应变:

$$\varepsilon_{\text{ref}} = (\sigma_d)_u / E_{\max} \quad (5)$$

将拟合结果列于表 5。拟合效果如图 13~16 所示。

表 5 不同应力历史条件下改进 Davidenkov 模型参数

Table 5 Improved Davidenkov model parameters under different stress histories

试验编号	$E_{\max}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\text{ref}}$	$A$	$B$	$R^2$
DT1-1	141.78	$1.29 \times 10^{-3}$	1.2	0.52	0.99
DT1-2	180.56	$1.15 \times 10^{-3}$	0.95	0.53	0.99
DT1-3	237.25	$1.14 \times 10^{-3}$	0.85	0.55	0.98
DT2-1	65.03	$2.11 \times 10^{-3}$	1.3	0.65	0.96
DT2-2	141.78	$1.29 \times 10^{-3}$	1.2	0.52	0.99
DT2-3	173.86	$1.85 \times 10^{-3}$	0.9	0.5	0.98
DT3-1	84.76	$1.61 \times 10^{-3}$	0.7	0.5	0.97
DT3-2	111.46	$1.47 \times 10^{-3}$	0.9	0.55	0.98
DT3-3	141.78	$1.29 \times 10^{-3}$	1.2	0.52	0.99
DT4-1	141.78	$1.29 \times 10^{-3}$	1.2	0.52	0.99
DT4-2	169.03	$1.16 \times 10^{-3}$	0.9	0.52	0.98
DT4-3	183.44	$1.09 \times 10^{-3}$	0.8	0.52	0.99

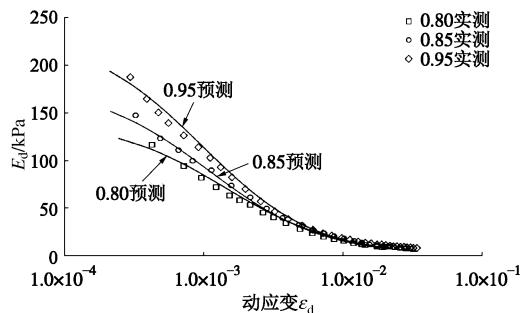


图 13 改进 Davidenkov 模型拟合效果 (不同压实度)

Fig. 13 Fitting effect of improved Davidenkov model (different compactnesses)

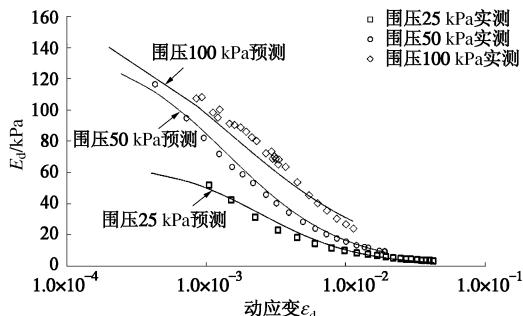


图 14 改进 Davidenkov 模型拟合效果 (不同围压)

Fig. 14 Fitting effect of improved Davidenkov model (different confining pressures)

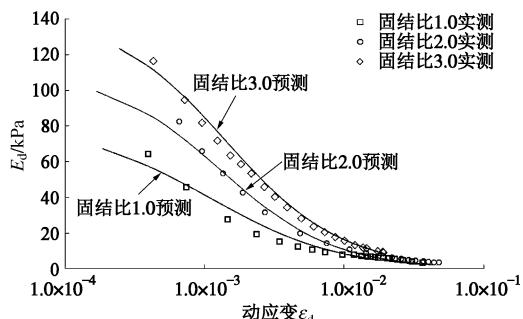


图 15 改进 Davidenkov 模型拟合效果 (不同固结比)

Fig. 15 Fitting effect of improved Davidenkov model (different consolidation ratios)

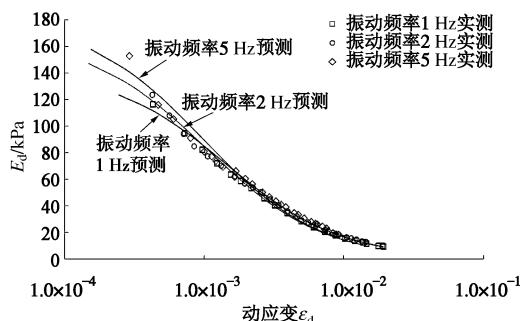


图 16 改进 Davidenkov 模型拟合效果 (不同振动频率)

Fig. 16 Fitting effect of improved Davidenkov model (different vibration frequencies)

从图 13~16 及表 5 可知, 采用改进的 Davidenkov

模型预测重塑红黏土动弹性模量随动应变的衰减规律是较为准确的, 拟合数据与试验数据间的相关系数达到了 0.97 以上。

模型参数变化方面, 压实度、围压、固结比和振动频率对模型参数是有影响的。随着压实度、围压和振动频率的提高, 模型中的  $E_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\text{ref}}$ ,  $A$  和  $B$  值是增加的; 固结比的提高,  $A$  和  $B$  的值是减小的。但是, 从影响的程度上将, 4 种试验条件对  $A$  值的影响相对较大, 对  $B$  值的影响相对较小。

### 2.3 土体动强度与最大动弹性模量影响因素分析

图 17~20 分别给出了不同应力路径条件对重塑红黏土动强度及最大动弹性模量的影响规律。

分析图 17~20 可知, 重塑红黏土动强度及最大动弹性模型的影响受应力历史的影响较为显著, 二者的变化规律是基本相同的。但不同因素影响的程度又有所不同, 这主要是土体自身性质及所处状态所决定。

由图 17~20 可知, 压实度和围压对提高土体动强度和最大动弹性模量意义更加显著。这是由于土体强度及模量受土颗粒咬合及摩擦控制, 提高土体密实度和围压, 土体颗粒间的孔隙减小, 颗粒间的摩擦力增大, 故宏观表现出随着压实度和围压的提高, 土体强度和模量提高较为显著。

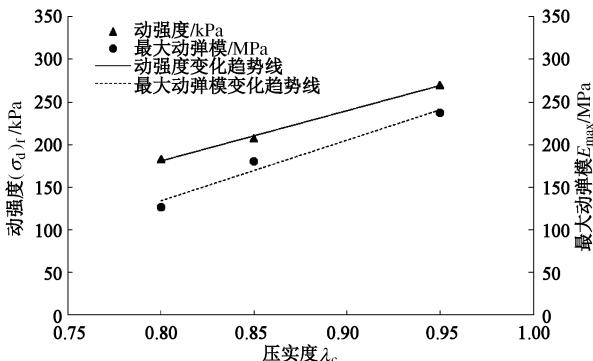


图 17 压实度对重塑红黏土动强度和最大动模量的影响

Fig. 17 Influence of compaction on dynamic strength and elastic modulus of remolded red clay

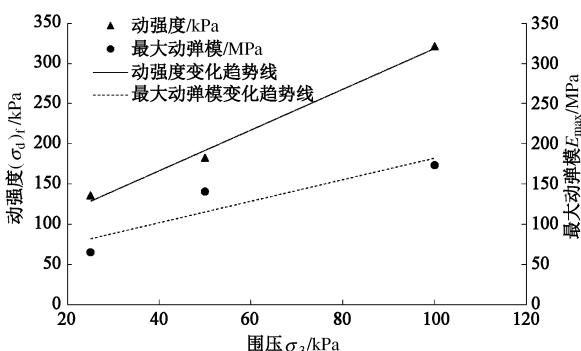


图 18 围压对重塑红黏土动强度和最大动模量的影响

Fig. 18 Influence of confining pressure on dynamic strength and elastic modulus of remolded red clay

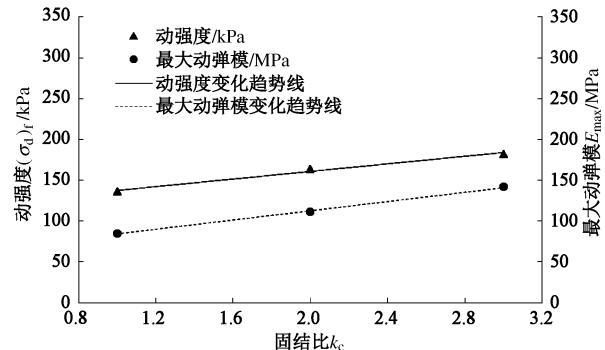


图 19 固结比对重塑红黏土动强度和最大动模量的影响

Fig. 19 Influence of consolidation ratio on dynamic strength and elastic modulus of remolded red clay

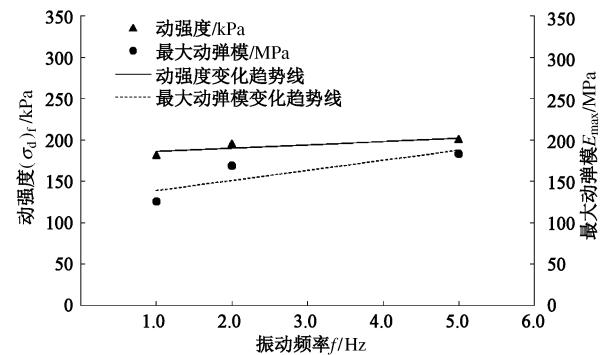


图 20 振动频率对重塑红黏土动强度和最大动模量的影响

Fig. 20 Influence of vibration frequency on dynamic strength and elastic modulus of remolded red clay

提高重塑红黏土所受的固结偏压, 土体动强度和最大动弹模也呈增加的趋势, 但其效果与提高压实度和围压的效果相比不甚明显。这说明对于重塑红黏土来讲, 由于其本身的强度较高, 尽管所受较大的固结偏压历史, 但土体整体结构并没有破坏, 反而使得土体更为密实, 故土体强度和模量有所提高。另一方面, 随着固结偏压的提高, 土样内部剪切面上必然存在局部破坏, 这种局部破坏就影响了土体强度和模量提高的效果。

提高动荷载的振动频率, 重塑红黏土的动强度和动模量也呈提高的趋势, 尽管这种增强的效果不是很明显, 但这与饱和土的规律明显不同。造成这种规律的原因在于, 一方面本次试验土样为重塑非饱和土样, 土样强度和动模量受土颗粒间的摩擦效应控制, 振动过程中土样在更短的时间内被压密, 土颗粒间的接触更加充分, 刚度得以提高, 且土样中的孔隙水压力变化很慢, 振动过程中水的润滑效应很小, 因此, 不像饱和土那样, 随着振动频率的增加, 土体中孔隙水压力迅速提高, 土样强度和动模量迅速降低; 另一方面, 在受过压密作用的条件下, 土样本身较为密实, 振动荷载对于提高土样密实的效果较弱, 因此, 对提高土体动强度和动模量的效果不甚明显。

## 2.4 经验公式

分析试验数据及规律可知, 应力历史对重塑红黏土动力特性有较为显著的影响。在受动荷载作用的岩土工程, 特别是交通工程中, 土体动力特性是影响工程稳定性的重要因素。因此, 前述大量动力特性试验的基础上, 本文将应力历史与重塑红黏土的动力指标建立了一套经验公式, 以供相关工程参考。但由于影响土体临界动强度的因素较多, 考虑到本次试验的局限性, 具体应用时土体条件应尽量与本次试验条件相同。

$$(\sigma_d)_f = 515.4\lambda_c + 26.65k_c + 2.54\sigma_3 + 2.68f - 431.93, \quad (6)$$

$$E_{\max} = 767.5\lambda_c + 20.1k_c + 1.25\sigma_3 + 15.7f - 625.1, \quad (7)$$

$$A = -1.99\lambda_c + 0.22k_c - 0.05\sigma_3 - 0.089f + 2.41, \quad (8)$$

$$B = -0.13\lambda_c + 0.026k_c - 0.0017\sigma_3 - 0.012f + 0.68. \quad (9)$$

## 3 结论与建议

本文通过对受不同应力历史的重塑红黏土土样进行三轴试验, 研究了应力历史对重塑红黏土动力特性的影响, 并分析了其规律, 试验结果表明:

(1) 应力历史对重塑红黏土动力特性有较大影响, 但不同应力历史条件的影响规律有所不同。在不超过重塑红黏土强度的范围内, 提高土体压实度、围压、固结比和振动频率, 有利于提高土体动强度和最大动弹性模量, 但受土体自身性质和状态的影响, 提高压实度和围压的效果更为显著。

(2) 与饱和土规律不同, 提高振动频率对于提高重塑红黏土动强度和动模量有正面意义。主要原因在于, 对于非饱和黏土, 提高振动频率对于孔隙水压力提高的效果不明显, 土体动强度和动模量仍然受控于土颗粒间的摩擦效应。

(3) 重塑红黏土动应力应变骨干曲线可由 Hardin 双曲线模型较好地描述。从骨干曲线可以看出, 重塑红黏土刚度较大, 在较小的应变条件下即可达到其动强度。当动应变达到 5% 时, 土体动应力即达到极限动强度的 0.95, 故可采用 5%~10% 作为判断重塑红黏土破坏的标准。

(4) 重塑红黏土动弹性模量的衰减可用改进的 Davidenkov 模型较好地描述。分析动模量的衰减规律可知, 土体动模量随动应变的增加衰减迅速, 最后稳定在一个较小模量。

(5) 在分析不同应力历史对重塑红黏土动力特性影响的基础上, 给出了重塑红黏土动强度及最大动弹性模与应力历史关系的经验公式, 可为相关工程提供参考。

## 参考文献:

- [1] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (Editorial of Engineering Geology Manual. Engineering geology manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 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 Wan-xue, CHEN Kai-sheng, XIAO Tao, et al. Research of general triaxial test for unsaturated red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 28~33. (in Chinese))
- [3] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红黏土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 42~47. (KONG Ling-wei, LUO Hong-xi, YUAN Jian-xin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 42~47. (in Chinese))
- [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 Ling-wei, LUO Hong-xi. 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. (in Chinese))
- [5] 柏巍, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土地基承载力和变形参数的空间分布特征分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 164~169. (BAI Wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Research on distribution characteristics of bearing capacities and deformation parameters of laterite ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 164~169. (in Chinese))
- [6] 柏巍, 万智. 红黏土地区地基承载力的可拓综合评测方法[J]. 公路, 2010(7): 85~90. (BAI Wei, WAN Zhi. Extension comprehensive prediction method for evaluation of subgrade bearing capacity of red clay area[J]. Highway, 2010(7): 85~90. (in Chinese))
- [7] 康景文, 甘鹰, 张仕忠, 等. 昆明新机场红黏土冲压地基处理实验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 496~500. (KANG Jing-wen, GAN Ying, ZHANG Shi-zhong, et al. Original stamping foundation treatment of red clay of new airport in Kunming[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 469~500. (in Chinese))
- [8] 杨松, 卢廷浩. 非饱和红黏土的不排气、不排水三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 356~359. (YANG Song, LU Ting-hao. Research on unventilated-undrained triaxial shear test of red cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 356~359. (in Chinese))
- [9] 梁斌, 莫凯. 不同含水率下重塑红黏土抗剪强度特性

- 的研究[J]. 山西建筑, 2010, **36**(4): 101 - 102. (LIANG Bin, MO Kai. Research on remodelling red clay's shear strength with different moisture ratio[J]. Shanxi Architecture, 2010, **36**(4): 101 - 102. (in Chinese))
- [10] 张金利, 蒋正国, 杨 钢. 聚丙烯纤维红黏土力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 420 - 425. (ZHANG Jin-li, JIANG Zheng-guo, YANG Gang. Experimental study on mechanical behaviors of polypropylene fiber reinforced clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 420 - 425. (in Chinese))
- [11] 聂庆科, 李佩佩, 王英辉, 等. 三轴冲击荷载作用下红黏土力学性状[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(6): 1220 - 1225. (NIE Qing-ke, LI Pei-pe, WANG Ying-hui, et al. Mechanical characteristics of red clay under triaxial impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(6): 1220 - 1225. (in Chinese))
- [12] 李佩佩. 强夯动力荷载作用下红黏土的工程特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. (LI Pei-pe. The research of the red clay's engineering characteristics under the dynamic load[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [13] KAYNIA A M, MADSHUS C, ZACKRISSON P. Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, ASCE, 2000, **126**(6): 531 - 537.
- [14] 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: 中南大学土木工程学院, 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))
- [15] 宫全美, 周顺华, 王炳龙. 地铁隧道地基土孔隙水压力变化及液化性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 290 - 292. (GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua, WANG Bing-long. Variation of pore pressure and liquefaction of soil in metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 290 - 292. (in Chinese))
- [16] 陈云敏, 边学成. 高速交通引起的振动和沉降[C]// 第七届全国土动力学学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2006: 3 - 13. (CHEN Yun-min, BIAN Xue-cheng. The vibration and settlement caused by high-speed transportation[C]// Proceedings of the Seventh National Soil Dynamics Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 3 - 13. (in Chinese))
- [17] 胡一峰. 高速铁路路基长期动力稳定性分析的理论和实践(SCR-SG021)[R]. 慕尼黑: 欧博迈亚公司, 2008: 10 - 30. (HU Yi-feng. Long-term dynamic stability of subgrade under high speed railway line from theory to practice (SCR-SG021)[R]. Munich: Corporation of Obermeyer in Germany, 2008: 10 - 30. (in Chinese))
- [18] 韩 卓. 振动荷载作用下路基动力响应试验与数值模拟[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2011. (HAN Zhuo. Experiment and numerical analysis of dynamic response of subgrade under vibration load[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese))
- [19] 李 剑. 高铁列车荷载作用下红黏土地基动力响应研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2013. (LI Jian. On dynamic response of the red clay foundation under high-speed train loading[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese))
- [20] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1970, **103**(6): 517 - 533.
- [21] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Adavanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [22] 李 剑, 陈善雄, 姜领发, 等. 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 Shan-xiong, JIANG Ling-fa, et al. Resonant column test on dynamic shear modulus and damping ratio of the remolded red clay and its law analysis[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, **45**(4): 62 - 68. (in Chinese))