

DOI: 10.11779/CJGE2023S10034

# 疏浚淤泥固化土路基动力特性研究

吴跃东<sup>1,2</sup>, 杨博文<sup>\*1,2</sup>, 顾建玲<sup>1,2</sup>, 刘 坚<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 为实现疏浚淤泥固化土的资源利用, 探究其作铁路路基填料的动力特性, 以山东泰安大清河河道清淤工程为背景, 针对疏浚淤泥固化土开展动三轴试验, 分析不同配比下的动应力-动应变关系和阻尼比等特性。结果表明: 不同配比试样动应力-动应变关系曲线变化趋势大体一致, 双掺粉煤灰比单掺水泥的试样在相同条件下产生更大的剪应变; 各配比下试样的阻尼比变化趋势基本一致; 阻尼比随着动剪应变的增加先减小再显著增加, 最终单掺试样的阻尼比稳定于 30%左右, 双掺试样稳定于 10%~20%; 得到土样累积塑性变形随振动次数的拟合对数曲线, 并评估得到各试样的累积塑性应变均满足动力稳定需求, 能为淤泥固化土用作铁路路基的研究提供一定参考价值。

**关键词:** 淤泥; 固化土; 路基填料; 动力特性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0034-05

**作者简介:** 吴跃东(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事软土地基处理和基础工程研究。E-mail: hhuwyd@163.com。

## Dynamic characteristics of dredged silt-solidified soil subgrade

WU Yuedong<sup>1,2</sup>, YANG Bowen<sup>1,2</sup>, GU Jianling<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** To realize the resource utilization of dredged silt-solidified soil and to explore its dynamic characteristics as the railway subgrade fill, the triaxial tests on the dredging project of Daqinghe River in Tai'an, Shandong Province are carried out, and the characteristics of dynamic stress-dynamic strain relationship, dynamic shear modulus and damping ratio under different ratios are analyzed. The results show that the trend of dynamic stress-strain relationship curve under different ratios is generally the same, and the double-mixture fly ash produces greater shear strain than the single cement sample under the same conditions. The change trend of the damping ratio under each ratio is basically the same. The damping ratio first decreases and then significantly increases with the increasing kinetic shear strain. The damping ratio of the final single sample is stable at about 30%, the double-mixture test sample is stable at 10%~20%. The fitted logarithmic curve of the cumulative plastic deformation of soil samples with the vibration number is obtained and evaluated, and it is obtained that the cumulative plastic strain of each sample meets the requirements of dynamic stability. It may provide some reference value for the feasibility of silt-solidified soil as the railway subgrade.

**Key words:** silt; solidified soil; subgrade fill; dynamic characteristic

## 0 引 言

中国铁路建设发展迅速, 列车行驶速度也不断刷新记录, 铁路建设中, 路基工程作为承担列车动荷载的主要部分, 其质量决定着工程的优劣, 而作为路基填料, 疏浚淤泥固化土的动力特性是路基工程中十分重要的设计和施工依据<sup>[1]</sup>。

众多国内外学者针对不同类型的土体动力特性参数的变化规律进行了研究, Saxena 等<sup>[2]</sup>研究了在小应变条件下选用固化材料水泥加固砂土的动力特性参数, 并首次建立了最大动态杨氏模量、动态剪切阻尼和动态纵向阻尼的经验关系; Fahoum 等<sup>[3]</sup>采用石灰为

固化材料研究其对 3 种不同黏性土的动力特性影响, 对比原状淤泥土, 石灰掺量的增加对 3 种改良后黏性土的动剪切模量均有提高作用, 对阻尼比起到降低效果; 蔡袁强等<sup>[4]</sup>着重研究了置换率、围压等因素对水泥土复合试样的动模量和阻尼比的影响, 得到围压较小时, 置换率对最大动模量的影响更为明显。同时也有学者对固化土在动力荷载循环振动作用下对强度、累积应变等一系列动力参数的影响进行了探究,

基金项目: 国家青年科学基金项目 (51608152)

收稿日期: 2023-07-14

\*通信作者 (E-mail: 1134131147@qq.com)

Sharma 等<sup>[5]</sup>通过循环三轴试验研究了水泥土循环剪切强度的机理, 提出一种评估循环剪切强度方式, 并发现水泥固化土的动强度与破坏周次的对数呈较强的线性关系; Subramaniam 等<sup>[6]</sup>研究了养护时间和振动周次对固化土动剪切模量影响, 并给出了预测动剪切模量退化的表达式。杨广庆等<sup>[7]</sup>通过动三轴试验研究了水泥土在动力荷载下的变形规律, 最终证实了水泥土作为铁路路基填料的可行性。

目前针对淤泥固化土这一方面的研究多集中在路堤填筑等普通的路基填筑工程, 将高含水率的疏浚淤泥用在铁路路基填料方面的研究尚有空缺。因此, 本文以山东泰安大清河河道清淤工程为背景, 开展淤泥固化土动三轴试验, 研究各配比下试样的动应力-动应变关系和阻尼比等特性的变化规律; 并分析其累积塑性应变, 根据拟合公式对其在服役期限内的变形进行预测, 判断疏浚淤泥固化土作为铁路路基填料的可行性, 最终实现对疏浚淤泥资源化利用的目标, 为现场施工提供合理的参考依据。

1 试验内容及方案

1.1 试验设备

本试验采用 GDS 高级动态三轴试验系统, 主要包括: ①压力室, ②动力驱动装置, ③围压控制器, ④反压控制器; ⑤数据采集仪。具体参数有: 轴向力最高为 10 kN, 其量程精确度小于 0.4 N; 装样尺寸为 50 mm; 轴向位移范围在 100 mm 内, 分辨率可达到 0.2 μm; 测量和控制的频率在 5 Hz 范围内; 围压范围在 2 MPa 内。

1.2 试验材料

本试验用土取自山东泰安大清河航道清淤工程现场, 所取土样属于粉质黏土, 其基本物理性质指标见表 1。经过絮凝脱水后得到的底泥为固化试验用土。选用国标普通硅酸盐 P.O42.5 水泥为主固化剂, 一级粉煤灰为辅助固化剂。

表 1 现场疏浚淤泥物理性质指标

Table 1 Physical property indices of dredged silt on site

干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数/ %	黏粒 含量/ %	粉粒 含量/ %	砂粒 含量/ %	PH 值
0.7	36.2	19.7	17.0	39.0	60.4	0.6	6.5

1.3 试样制备及养护

试样尺寸设计为 50 mm×100 mm 的圆柱样。根据试样质量, 将试样分 5 次均匀装入模具内。养护龄期为 28 d。养护箱的温度设定在 (20±2) °C, 相对湿度设定在 95%。在进行动三轴试验之前, 采用抽真空法对试样进行饱和。

1.4 试验方案

试验时剪切方式为固结不排水, 固结应力比  $K_c=1$ 。根据本文工程背景, 路基填筑高度不高, 故试验围压设定为 100 kPa。波形采用等幅的单侧半正弦波。根据影响路基振动频率最大的列车行驶频率<sup>[8]</sup>, 选取试验频率  $f=2$  Hz, 且采用应力控制式分级施加动荷载, 从 20 kPa 至 520 kPa 分 18 级加载。具体工况见表 2。

表 2 试验工况方案

Table 2 Test schemes for working conditions

初始 含水率/%	单掺水泥/ %	强度/ kPa	双掺粉 煤灰/%	强度/ kPa
50	6	759		621
60	8	645	15	871
70	10	654		772

2 试验结果分析

2.1 动应力-动应变关系

图 1 为固化土在逐级加载下的变形图, 取每一级加载下所形成滞回圈的最高点进行连线即可得到后续的动应力-应变曲线 (即骨干曲线)。

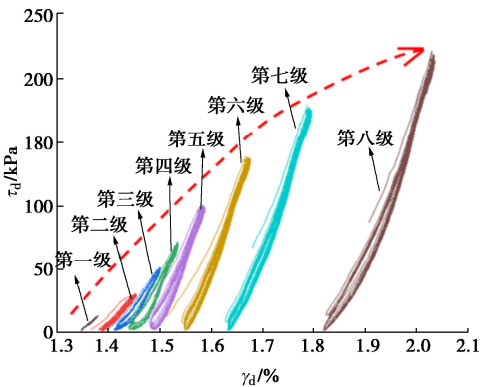


图 1 固化土样逐级加载下的变形

Fig. 1 Deformations under progressive loading of solidified soil samples

如图 2 所示, 在试验开始阶段, 试样受到的应力幅值较小, 固化土结构稳定, 结构扰动变化微小, 动应力-动应变曲线基本呈线性发展; 随着应力幅值的增加, 土体内部结构发生变化, 产生较大应变, 动应力-动应变曲线斜率因此降低, 并趋于平缓, 这说明此时固化土已从最初的弹性阶段逐渐过渡到弹塑性阶段, 这与前人的试验数据变化趋势大致相同 (图 b 中的蓝色曲线)。同时, 由于 3 个含水率下固化土的固化材料掺量逐渐增加, 固化土的线弹性段在逐渐减小, 这是因为固化剂为土体提供了一定的刚度, 能够使土样在低应变下就可以达到较高的刚度, 并快速过渡到弹塑性阶段。

对比图 2 (a), (b), (c), 其中含水率为 50% 的曲线形状与另外两组在低应变条件下的发展趋势略有不同, 呈 S 型趋势, 这可能是因为含水率较低的试样

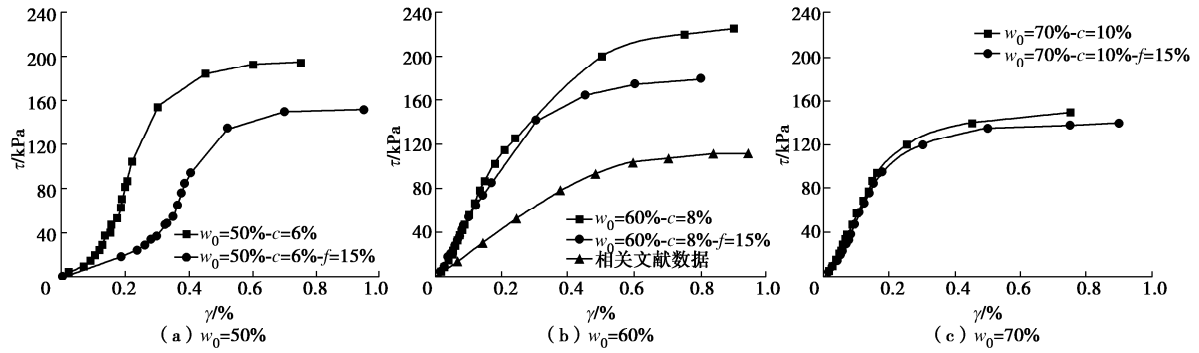


图2 各配比下的动应力-动应变关系曲线

Fig. 2 Dynamic stress-dynamic strain relationship curve under each ratio

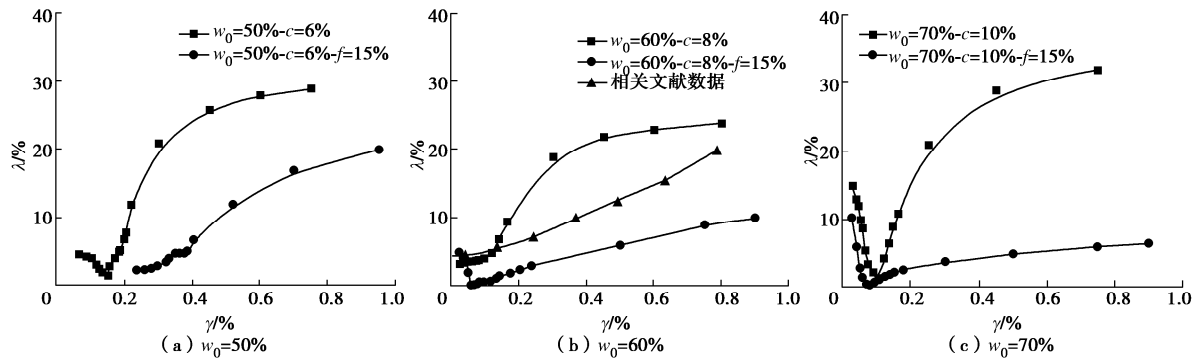


图3 各配比下的阻尼比-动剪应变关系曲线

Fig. 3 Damping ratio-dynamic shear strain curves under different mix proportions

对小剪应力的作用较为敏感, 从而造成较大的动剪应变, 随着剪应力的增加, 其变化趋势与其余土样一致。

分析每组含水率下的两条曲线, 双掺粉煤灰的试样总是处于单掺水泥试样的下侧, 即相同剪应力作用下, 添加了粉煤灰的试样所引起的动剪应变较大, 因此模量较小。分析其中原因, 粉煤灰颗粒较大, 且内部存在大量孔隙, 同时其颗粒能够起到一定的润滑作用, 从而导致土样产生“变软”的现象, 造成土样较未添加粉煤灰试样在相同应力条件下的应变更大。

## 2.2 阻尼比

由图3可知, 各组试样的阻尼比随着动剪应变的增加而呈现先减小再显著增加并趋于稳定的趋势, 这与 Maher 等<sup>[9]</sup>和 Delfosse-Ribay 等<sup>[10]</sup>采用硅酸盐类固化剂来加固无黏性土的试验结果一致, 并且各试样的阻尼比在 0%~35% 变化。图3中低应变区阻尼比降低的原因可能是较小的应力对土体起到一定的压实作用, 此时孔隙的“剧烈调整”所引起的滞回阻尼起主导作用, 其作用很小, 所以阻尼比接近于 0; 随着剪应力的逐渐增加, 土体内部颗粒接触紧密, 此时土样克服耗能的能力逐渐提高, 即阻尼比增大。

分析各组不同初始含水率下的两组试样, 单掺水泥固化土试样的关系曲线总是处于双掺粉煤灰固化土试样的上方, 这表明单掺水泥的试样在相同动剪应变

的条件下克服能量消耗的需求更大, 这是因为相较于单掺水泥, 加了粉煤灰的固化土试样其内部颗粒不再是单一尺寸, 而是由较大尺寸的水泥颗粒与较小尺寸的粉煤灰颗粒相互穿插联结, 即固化土结构内部的颗粒级配更加均匀, 因此结构更加均匀稳定, 试样抵抗振动所消耗的能量减小, 因此代表克服能量损耗能力的阻尼比减小。

## 2.3 累积塑性变形

沉降是保障铁路路基安全稳定的重要控制指标, 在长期动荷载作用下, 路基填料的变形逐渐积累, 会产生较大的累积塑性应变和孔压累积, 对列车行驶造成安全隐患, 因此有必要对服役期限内的路基沉降进行分析, 即评估土体在动荷载作用下的累积塑性应变<sup>[11]</sup>。

通过动三轴试验模拟铁路荷载, 基于开展有限循环周次动力加载的应力应变试验数据, 利用对数函数模型拟合<sup>[12]</sup>累积塑性应变  $\varepsilon_p$  和循环周次  $N$  的关系, 具体公式如下:

$$\varepsilon_p = a \ln N + b \quad (1)$$

式中,  $a$ ,  $b$  为拟合参数。

根据拟合公式对土样的累积塑性应变进行预测。典型关系曲线如图4所示, 曲线拟合度达 0.9826 ( $> 0.95$ ), 因此可以很好地预测路基的累积塑性变形。

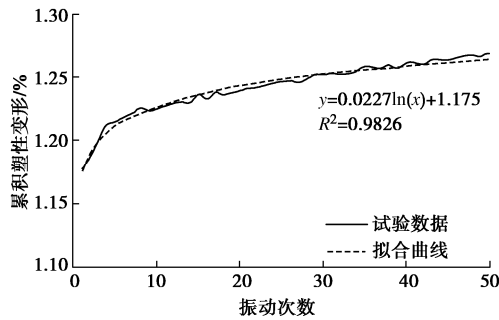


图 4 累积塑性变形-振动次数关系曲线

Fig. 4 Cumulative plastic deformation-vibration number curves

本文工程背景为码头货物运输的铁路路基施工, 在实际情况下, 每天货车运输次数约为 6 次 (单程), 拟定该铁路服役期为 50 a, 因此可以取 10 万次的动荷载加载次数作为铁路达到服役期时所经历的货车运输所施加的列车荷载。因此, 基于图 4 拟合公式, 对各配比下固化土在 10 万次循环加载时的累积变形作出预测, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 随着动应力幅值的增加, 各试样的累积塑性应变逐渐增大, 并且增长速率逐渐提高。主要原因是在较大动应力幅值的循环作用下, 土体扰动较大, 变形累积速率更快。对比 3 个含水率下的两条曲线关系, 双掺粉煤灰的试样数据曲线始终处于单掺水泥试样的曲线上侧, 说明加了粉煤灰的试样会使土体变“软”, 在相同动应力幅值作用下会产生较大的累积塑性变形。

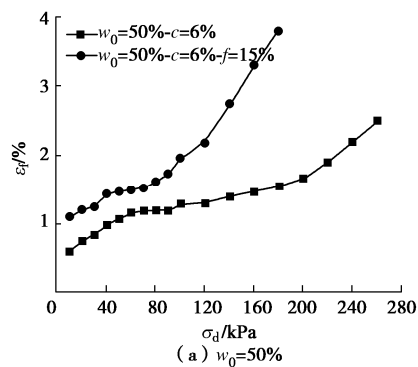
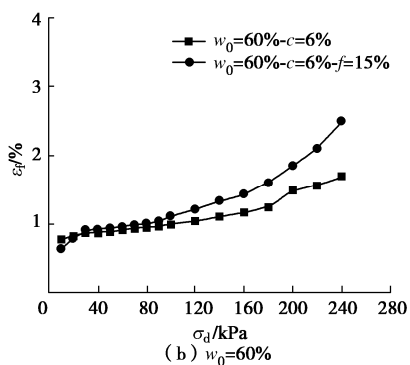
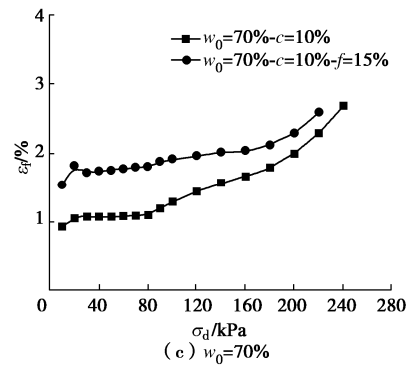
(a)  $w_0=50\%$ (b)  $w_0=60\%$ (c)  $w_0=70\%$ 

图 5 各配比下的动应力幅值-最终累积塑性变形关系曲线

Fig. 5 Dynamic stress amplitude-final cumulative plastic deformation curves

从图 5 中不难发现, 6 组试样振动周次达到 10 万时的累积塑性应变大多小于 3%, 未达到 5% 的破坏标准, 表明以上配比固化土具有良好的抵抗变形能力。以 10 m 高的路基为例, 沉降控制在 30 cm 以内, 满足规范对沉降的要求, 这为资源化利用疏浚淤泥, 将固化土用作铁路路基填料提供了工程参考。

### 3 结 论

针对山东泰安大清河航道疏浚进淤泥固化土进行了动三轴试验, 分析了各试样的动应力-动应变关系和阻尼比的变化规律。通过拟合曲线预测 10 万次列车循环荷载作用下的土样累积塑性变形, 从而判断各配比固化土作为铁路路基填料在服役期限内能否满足沉降控制指标。

(1) 各配比试样的动应力-动应变关系曲线变化趋势大致相同: 在试验初期, 曲线基本呈线性发展, 随着应力幅值的增加, 曲线斜率降低并趋于平缓。各组含水率下双掺粉煤灰比单掺水泥的试样在相同剪应力条件下产生更大的剪应变。

(2) 各配比试样的阻尼比变化趋势基本一致: 阻尼比随着动剪应变的增加先减小再显著增加, 最终单掺试样的阻尼比稳定于 30% 左右, 双掺试样稳定于 10%~20%。

(3) 通过拟合得到的对数曲线可以较好地拟合土样在各动应力下的累积塑性变形随振动次数的变化关系, 并且各配比下试样的累积塑性变形变化趋势基本一致: 随着动应力幅值的增加, 各试样的最终累积塑性变形有所增加, 且增幅明显。在相同初始含水率情况下的双掺粉煤灰试样总是产生更大的累积塑性应变。各配比固化土样通过经验公式预测得到各试样的累积塑性应变均在 4% 以内, 未达到 5% 应变破坏标准, 通过换算, 沉降控制能够满足规范要求, 满足动力稳定需求。

## 参考文献:

- [1] 彭荟源. 交通荷载下铁路路基粗粒填料动力特性研究[J]. 土工基础, 2023, **37**(1): 124-127. (PENG Huiyuan. Dynamic characteristics of coarse grained backfill of high railway base under the traffic load[J]. Soil Engineering and Foundation, 2023, **37**(1): 124-127. (in Chinese))
- [2] SAXENA S K, AVRAMIDIS A S, REDDY K R. Dynamic moduli and damping ratios for cemented sands at low strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, **25**(2): 353-368.
- [3] FAHOUM K, AGGOUR M S, AMINI F. Dynamic properties of cohesive soils treated with Lime[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(5): 382-389.
- [4] 蔡袁强, 梁旭, 李坤. 水泥土-土复合试样的动力特性[J]. 水利学报, 2003, **34**(10): 19-25. (CAI Yuanqiang, LIANG Xu, LI Kun. Dynamic characteristics of composite sample of cemented clay-clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **34**(10): 19-25. (in Chinese))
- [5] SHARMA S S, FAHEY M. Evaluation of cyclic shear strength of two cemented calcareous soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(7): 608-618.
- [6] SUBRAMANIAM P, BANERJEE S. Factors affecting shear modulus degradation of cement treated clay[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **65**: 181-188.
- [7] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(7): 1156-1160. (YANG Guangqing. Study of dynamic performance of cement-improved soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(7): 1156-1160. (in Chinese))
- [8] 王佳, 张家生, 孟飞, 等. 交通荷载作用下公路路基动力响应研究[J]. 路基工程, 2013(2): 7-10, 14. (WANG Jia, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Study on dynamic response of highway subgrade under traffic loads[J]. Subgrade Engineering, 2013(2): 7-10, 14. (in Chinese))
- [9] MAHER M H, RO K S, WELSH J P. High strain dynamic modulus and damping of chemically grouted sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1994, **13**(2): 131-138.
- [10] DELFOSSE-RIBAY E, DJERAN-MAIGRE I, CABRILLAC R, et al. Shear modulus and damping ratio of grouted sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, **24**(6): 461-471.
- [11] 冷伍明, 翟斌, 徐方, 等. 基于大型动三轴试验的粗粒土累积塑性应变概率模型研究[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(15): 214-220, 249. (LENG Wuming, ZHAI Bin, XU Fang, et al. Probabilistic model of cumulative plastic strain of coarse-grained soil fill based on large-scale dynamic triaxial tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, **39**(15): 214-220, 249. (in Chinese))
- [12] 赵莹莹. 重载列车荷载下路基素填土与改良土力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (ZHAO Yingying. Mechanical Properties of Plain Soils and Improved Soils Subjected to Heavy-Haul Train Load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))

(编校: 孙振远)