

引文格式:岳夏冰,肖天鹏,陈炳旭,等. 洪积粉砂土动力特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(4): 157-166.

YUE Xiabing, XIAO Tianpeng, CHEN Bingxu, et al. Study on dynamic characteristics of alluvial silty sand[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(4): 157-166.

DOI:10.19815/j.jace.2023.12096

## 洪积粉砂土动力特性研究

岳夏冰<sup>1</sup>, 肖天鹏<sup>1</sup>, 陈炳旭<sup>2</sup>, 王志丰<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

**摘要:**为探究洪积粉砂土填料的动力特性,考虑动应力幅值、含水率、围压和频率的影响进行了洪积粉砂土填料动三轴试验,研究了洪积粉砂土试样在不同影响因素下的动力变形规律,并建立了动弹性模量与动应变、动强度与循环次数的拟合曲线模型。结果表明:随着循环次数的增加,洪积粉砂土的累积塑性应变逐渐增大,加载初期累积塑性应变积累较快,但1 000次循环后保持相对稳定;动弹性模量随着塑性变形的增加而发生衰减,围压和含水率对洪积粉砂土的动弹性模量影响较大,当围压越大且含水率接近最佳含水率时,动弹性模量越大;阻尼比随着应变的增加呈非线性增长;洪积粉砂土的动强度与围压呈正相关关系,而与循环次数呈负相关关系。

**关键词:**洪积粉砂土;累积塑性应变;动三轴试验;动弹性模量;动强度

中图分类号:TU411

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)04-0157-10

## Study on dynamic characteristics of alluvial silty sand

YUE Xiabing<sup>1</sup>, XIAO Tianpeng<sup>1</sup>, CHEN Bingxu<sup>2</sup>, WANG Zhifeng<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, Shanghai 200070, China)

**Abstract:** In order to explore the dynamic characteristics of alluvial silty sand filler, the dynamic triaxial test of alluvial silty sand filler was carried out considering the influence of dynamic stress amplitude, water content, confining pressure and frequency. The dynamic deformation law of alluvial silty sand samples under different influencing factors was studied, and the fitting curve models of dynamic elastic modulus and dynamic strain, dynamic strength and cycle times were established. The results show that with the increase of the number of cycles, the cumulative plastic strain of alluvial silty sand increases gradually, and the cumulative plastic strain accumulates rapidly at the initial stage of loading, but remains relatively stable after 1 000 cycles. The dynamic elastic modulus decreases with the increase of plastic deformation. The confining pressure and water content have a great influence on the dynamic elastic modulus of alluvial silty sand. When the confining pressure is larger and the water content is close to optimal water content, the dynamic elastic modulus is larger. The damping ratio increases nonlinearly with the increase of strain. The dynamic strength of alluvial silty sand is positively correlated with confining pressure and negatively correlated with the number of cycles.

**Key words:** alluvial silty sand; cumulative plastic strain; dynamic triaxial test; dynamic elasticity modulus; dynamic strength

**Author resume:** YUE Xiabing(1987-), female, PhD, senior engineer, E-mail: yuexb@chd.edu.cn.

0 引言

赤峰至曹妃甸公路(赤曹公路)周边洪积粉砂土资源丰富,价格低廉,将其作为路基填料可以减少石料的使用和开采,节约运输成本,从而降低工程造价,但需要对其开展动力特性研究。粉砂土的力学特性不仅取决于粒度成分、粒度配置和含水率,还与成因类型、矿物组成、沉积年龄、地理、历史环境和空间分布密切相关<sup>[1-6]</sup>。

土在动荷载作用下呈现非线性、软化性和滞后性,动应力-动应变关系可用黏弹性模型和弹塑性模型描述<sup>[7-10]</sup>。学者们采用不同模型研究土的动力特性,如 Ni 等<sup>[11]</sup>提出了一个新的土体循环加载本构模型,用于预测软黏土在未排水循环三轴加载下的行为,新模型还可以考虑影响软土循环性能的许多因素,如循环应力比、预剪和循环加载频率。为了研究在动荷载作用下粉砂土的累积变形,田小草等<sup>[12]</sup>通过控制围压、含水率、动应力幅值、压实度以及干湿循环次数进行动三轴试验,分析粉砂土在不同因素影响下累积塑性应变变化规律。黄窈婷<sup>[13]</sup>通过控制固结比、频率、固结压力等因素通过动三轴试验来研究饱和粉砂土的动强度。为了研究粉砂土的动强度,董正方等<sup>[14]</sup>控制干密度、围压和细粒含量,对粉砂土进行动三轴试验,分别分析 3 个影响因素对黄泛区粉砂土动强度的影响。来淑娜<sup>[15]</sup>控制荷载频率、固结比以及围压等因素来研究饱和粉砂土的动强度。孟凡丽等<sup>[16]</sup>研究了不同围压、频率和固结比条件下的循环荷载对杭州粉砂土动孔压增长的影响。张博等<sup>[17-21]</sup>探究了不同细粒含量对粉砂土动力特性的影响规律,发现在土体应变较小时,动剪切模量随着围压和干密度的增加而增加,阻尼比随着围压和干密度的增加而减少。周金领等<sup>[22]</sup>对粉砂土进行了共振柱和动三轴试验,发现动剪切模量和阻尼比都可以利用双曲线模型进行拟合,拟合程度良好。同时一些学者还研究了改良粉砂土的动力特性和冻融循环对粉砂土动力特性的影响,例如崔高航等<sup>[23]</sup>对不同粉煤灰掺入量下饱和粉砂土中粉煤灰掺入量对动骨干曲线动弹性模量的影响规律进行了探究。王晶晶<sup>[24]</sup>通过无机结合料改良粉砂土,对其动力特性展开了系统研究。张云龙等<sup>[25]</sup>对冻融循

环下不同含水率的粉砂土进行了动三轴试验,发现随着含水率的增加,冻融循环的次数对粉砂土黏聚力的影响逐渐增大。孙静等<sup>[26]</sup>对冻融循环作用下的粉砂土进行动三轴试验,发现随着粉砂土冻融循环次数的增加,最大动弹性模量逐渐减小,动弹性模量比和阻尼比随之增大。朱成浩<sup>[27]</sup>研究了粉砂土的动力特性在冻融循环和多因素环境影响作用下的参数变化。

上述研究大多关于恒定动荷载下粉砂土动力特性,而作为路基填料所承受的车辆荷载和频率大多不是恒定的。针对现有研究的不足,本文以洪积粉砂土为研究对象,利用 GDS 动三轴试验设备,探讨循环动荷载下围压、含水率等因素对洪积粉砂土动力特性的影响,建立了洪积粉砂土的拟合曲线,得到了土在不同条件下的动强度值,为洪积粉砂土作为路基填料的可行性提供了可靠的理论依据。

1 基本物理试验

1.1 颗粒级配试验

采用筛分法对赤曹公路洪积粉砂土的颗粒进行分析,结果见图 1。

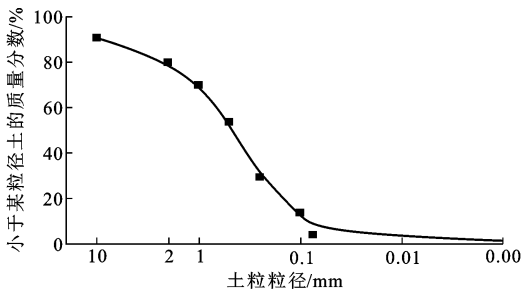


图 1 赤曹公路洪积粉砂土的颗粒级配

Fig. 1 Particle size distribution of alluvial silty sand on Chicao highway

洪积粉砂土颗粒相对密度  $d_s$  为 2.68,不均匀系数  $C_u$  为 7.43,曲率系数  $C_c = 2.42$ 。因  $C_u > 5$ ,  $1 < C_c < 3$ ,所取洪积粉砂土属于级配良好土样。

1.2 界限含水率试验

界限含水率试验液塑限结果见表 1。

表 1 液塑限结果

Table 1 Liquid plastic limit results

指标	液限 $W_L$ / %	塑限 $W_P$ / %	塑性指数 $I_p$
数值	29.6	21.2	8.4

### 1.3 击实试验

通过击实试验得到土样干密度与含水率之间的关系,如图 2 所示。由图 2 可知,土样的最佳含水率为 8.0%,最大干密度为  $1.975\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

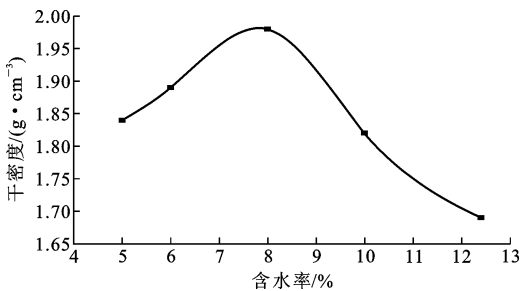


图 2 土样的击实曲线

Fig. 2 Compaction curve of soil sample

## 2 动力特性试验

### 2.1 试验仪器

本次试验采用的 GDS 动三轴试验设备如图 3 所示。GDS 动态三轴测试仪可施加最大  $\pm 10\text{ kN}$  的动态轴向载荷,频率区间为  $0\sim 5\text{ Hz}$ ,精度为区间的  $0.1\%$ 。试样最大变形为  $100\text{ mm}$ ,位移分辨率为  $0.208\text{ mm}$ ,精度为区间的  $0.07\%$ ,可模拟三角波、正弦波、正波、方波、梯形波、斜波等波形。



图 3 GDS 动三轴设备

Fig. 3 GDS dynamic triaxial equipment

### 2.2 试验过程

#### 2.2.1 试件制备

以  $95\%$  压实度来控制干密度,制备三轴试样。首先将试验土过  $2\text{ mm}$  的细筛,取出  $2\text{ mm}$  粒径土样进行烘干,以含水率  $8\%$  和干密度  $1.79\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  为例,计算出所需干土质量  $301.56\text{ g}$  和水的质量  $49.91\text{ g}$  进行配比,在不吸水的托盘中搅匀后进行称重,分 6 层制备试样,每层之间刮毛以避免分层,试样尺寸为  $50\text{ mm}$ (直径) $\times 100\text{ mm}$ (高度),动三轴标准试样如图 4 所示。

#### 2.2.2 试验方案

加载波形设置为正弦波。在固结方面,参照郭婷婷<sup>[28]</sup>对土样固结比情况的研究,同时考虑到实际



图 4 动三轴标准试样

Fig. 4 Dynamic triaxial standard specimen

工程中洪积粉砂土的应力状态是偏压状态,因此选择了固结比为 1.5 作为试验条件。参考前人实测路基应力的情况,路基基床表层的侧向压力大致在  $20\sim 60\text{ kPa}$ <sup>[29]</sup>,考虑到路基安全及不同深度时的围压,因此试验过程围压分别取  $30$ 、 $50$ 、 $80\text{ kPa}$ 。试验含水率按  $6\%$ 、 $8\%$ 、 $10\%$  三种情况来模拟含水状态不同的路基。为了研究洪积粉砂土极限状态,试验过程中动应力幅值取  $50$ 、 $100$ 、 $200\text{ kPa}$ 。根据实际车辆荷载产生频率和众多学者经验,本文频率采用  $1$ 、 $3$ 、 $5\text{ Hz}$ 。本次试验主要从 4 个方面考虑,包括土的埋置深度、降水、道路所受车辆荷载、动应力大小。加载破坏方式采用应变控制,分别对试样进行单级和多级加载,采用室内动三轴仪器进行车辆荷载的波形加载。

在单级加载试验中,先在开始界面对不同含水率下试样进行等向水压固结,然后进行单级加载。使用  $1\text{ Hz}$  的频率进行加载,然后在不同围压下施加不同的动应力,直至试样达到设置的破坏要求和需要的循环次数(本次循环次数设置为  $10\text{ 000}$  次)。

在多级加载试验中,先对不同含水率下的试样施加围压,然后进行固结,随后逐级加载,每次增加  $20\text{ kPa}$ 。加载频率采用  $1$ 、 $3$ 、 $5\text{ Hz}$ ,直到试样应变达到  $5\%$  破坏或者循环  $5\text{ 000}$  次。具体的动三轴试验方案见表 2。

表 2 动三轴试验方案

Table 2 Dynamic triaxial test scheme

参数	含水率/%	围压/kPa	频率/Hz	动应力幅值/kPa
单级	6、8、10	30、50、80	1	50、100、200
多级	6、8、10	30、50、80	1、3、5	20(逐级加载)

3 试验结果分析

3.1 累积塑性应变

3.1.1 累积塑性应变与含水率的关系

图 5 为试样在围压为 30、50、80 kPa 时,不同含水率下累积塑性应变随着循环次数增加的变化情况。当循环次数达到 2 000 次之后,土样内部变得密实,累积塑性应变保持不变。随着含水率的增加,土样的累积塑性应变逐渐增加,最佳含水率下的洪积粉砂土样具有最小的累积塑性应变,因为水在土颗粒之间起到了润滑剂作用,土体在最佳含水率时拥有最稳定的土体结构。当含水率增大或者减小时容易造成土样结构破坏,导致土体产生不可恢复的塑性变形。

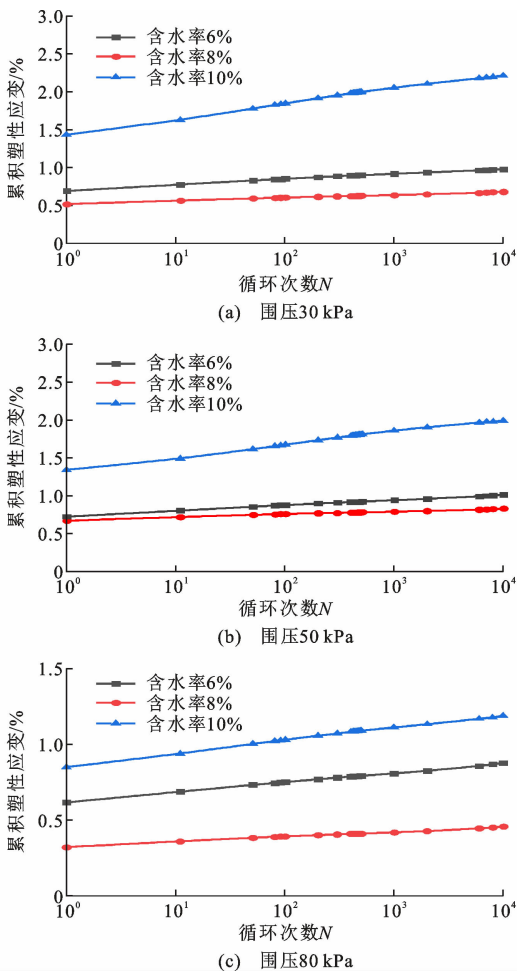


图 5 不同含水率下土样的累积塑性应变  
Fig.5 Cumulative plastic strain of soil samples under different water contents

在含水率相同、围压不同的情况下,随着围压的增加,累积塑性应变逐渐降低。对于所受围压为 30 kPa、最佳含水率为 8% 的土样,当外荷载循环次数

为 10 000 次时所产生的累积塑性变形是围压为 80 kPa 时的 310.2%,是同等条件下围压 50 kPa 时累积塑性应变的 121.6%。

3.1.2 累积塑性应变与频率关系

以含水率为 8%、围压为 50 kPa 的试样为例,不同动应力幅值时各频率下土体扰动的影响结果如图 6 所示。动应力相同时,不同频率下的累积塑性应变差距不大,对试样塑性变形有较小的影响。当循环次数达到 3 000 次时,试样土的累积塑性应变已经稳定于某一固定值。在其他工况都相同时,累积塑性应变由小到大对应的频率依次为 1、5、3 Hz,其原因为,在较低的频率下,小的动应力振幅不仅不会对洪积粉砂土造成破坏,而且在加载的初始阶段具有致密化作用。频率越低,应力分布传递越充分,土体压实效果越好,强度越大,抗变形能力越好。随着频率的增加,土样骨架开始遭到破坏,外荷载产生的动应力具有破坏能力,导致土样变形达到最大;当超过某一频率时,加卸荷时间变短,应力不能完全得到释放,导致土体相对骨架结构和土体硬度更大,抗变形能力和承载能力更强,被压缩后土样变形量也降低。

3.1.3 洪积粉砂土的安定性分析

在试验循环振动荷载作用下,由于施加的循环应力比(CSR)依次递增,直至试样产生破坏,CRS 取值  $\gamma$  为动应力幅值  $\sigma_d$  和 2 倍围压  $\sigma_3$  的比值,即

$$\gamma = \frac{\sigma_d}{2\sigma_3} \tag{1}$$

由于施加的上部动荷载不同,土样累积塑性应变关系图像存在很大差异,路基填料在交通循环荷载作用下的动力行为可分为 3 种典型情况,即塑性安定、塑性蠕变和增量破坏<sup>[30]</sup>。

在围压为 80 kPa 的情况下,该洪积粉砂土的总应变随着施加的动应力幅值增加而变大,在不断振动作用下,总应变也在不断变大(图 7)。动应力幅值在 50、100、200 kPa 下时,土样都能趋于稳定,在 300 kPa 状态下时,土样发生破坏。

基于上述试验结果,结合安定理论,发现随着循环应力比的增大,洪积粉砂土试样将从塑性安定转为塑性蠕变,当循环应力比增大到一定程度时发生增量破坏。

3.2 土的动弹性模量

3.2.1 土动弹性模量与含水率的关系

动弹性模量  $E_d$  是路基土的一个重要动态力学指标,它反映了土体抵抗外界荷载作用时保持自身

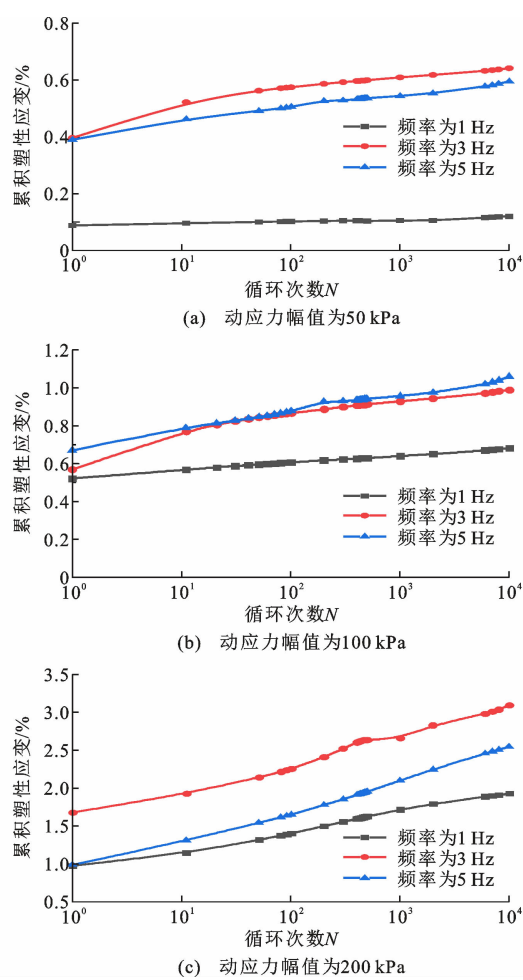


图 6 不同频率下土样的累积塑性应变  
Fig. 6 Cumulative plastic strain of soil samples at different frequencies

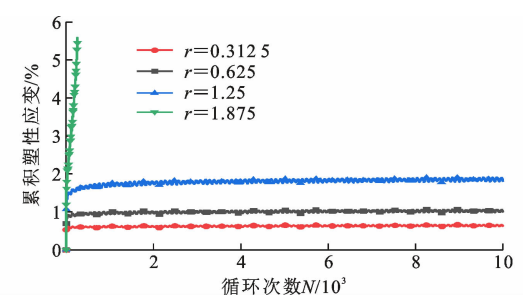


图 7 累积塑性应变随循环次数的变化曲线  
Fig. 7 Change curve of cumulative plastic strain with number of cycles

结构不变的一种能力,其计算公式为

$$E_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为最大动应力; $\sigma_{\min}$ 为最小动应力; $\epsilon_{\max}$ 为最大动应变; $\epsilon_{\min}$ 为最小动应变幅。

图 8 为不同初始含水率下土样动弹性模量  $E_d$  随动应变幅  $\epsilon_d$  的变化关系。由图 8 可知, $E_d$  随  $\epsilon_d$

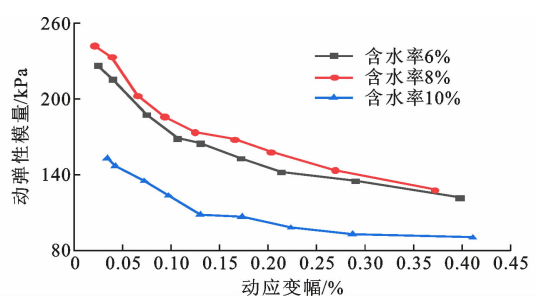


图 8 不同含水率下土样动弹性模量-动应变幅关系  
Fig. 8 Dynamic elastic modulus-dynamic strain amplitude relationship of soil samples with different moisture contents  
的增加非线性减小, $\epsilon_d$  越大, $E_d$  变化幅度逐步减小;含水率为 8%(最优含水率)时,动弹性模量最大;当含水率过大时,动弹性模量达到最小,这是因为土体内水分增多以后,土颗粒之间结合水膜变厚,胶结作用逐渐减弱,凝聚力降低;当含水率较低时,土颗粒之间摩擦阻滞较强,较难发生颗粒调整变形,有可能导致动弹性模量较高。

### 3.2.2 土动弹性模量与围压的关系

图 9 为不同围压下土样动弹性模量-动应变幅关系。可以看出,不同围压状态下的洪积粉砂土动弹性模量  $E_d$  均随动应变幅值  $\epsilon_d$  的增加非线性减小,其原因为土体在受到动荷载作用时会出现动态应力集中现象,致使土颗粒之间发生接触变形,甚至破碎,土体整体抵抗外界动荷载作用下降,且随应变增加趋于平缓。同时,由图 9 的整体曲线趋势可知,动弹性模量会随着围压的增大而变大,围压 80 kPa 时的动弹性模量整体大于围压 50 kPa 和 30 kPa 时的动弹性模量,其原因为围压的增加可以使土体颗粒之间的相互作用力增强,颗粒更加紧密地堆积在一起,增加土体整体抵抗变形的能力,导致动弹性模量增大。

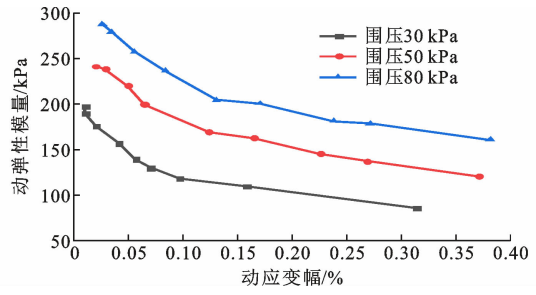


图 9 不同围压下土样动弹性模量-动应变幅关系  
Fig. 9 Dynamic elastic modulus-dynamic strain amplitude relationship of soil samples under different confining pressures



3.2.3 土动弹性模量与加载频率的关系

图 10 为不同频率下土样动弹性模量-动应变幅关系曲线。由图 10 可知,动弹性模量  $E_d$  随频率  $f$  的变化较小,随动应力幅值的增加而减小。频率从 3 Hz 增加到 5 Hz 时,动弹模量有减小的趋势,其原因可能是当频率过高时,洪积粉砂土不再产生紧密现象,内部会形成微裂纹和结构损伤,导致动弹性模量减小。

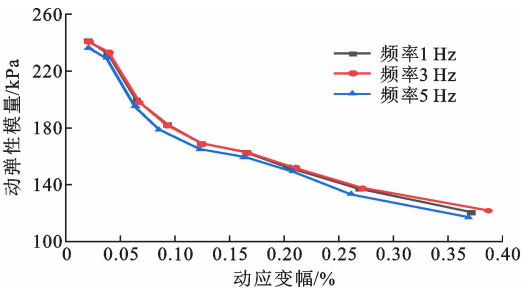


图 10 不同频率下土样动弹性模量-动应变幅关系  
Fig. 10 Dynamic elastic modulus-dynamic strain amplitude relationship of soil samples at different frequencies

3.2.4 动弹性模量-动应变拟合关系

分析不同围压、含水率和频率的动弹性模量随动应变幅变化规律可知,不同条件下洪积粉砂土的动弹性模量随着振动作用下累积变形的增加而降低,直至趋于稳定。在动荷载振动初期,动弹性模量下降速度较快,随着循环次数的增加,动弹性模量降低频率趋于 0。根据图像数字模型可得动弹性模量-动应变幅拟合曲线关系式为

$$E_d = A \epsilon_d^B \tag{3}$$

式中: $A$ 、 $B$  为试验未知参数。

不同试验工况下数学模型未知参数和判定系数  $R^2$  如表 3 所示。由于  $B$  值不明显,当统一固定  $B$  值为  $-0.2$  时,得出新的拟合关系式  $E_d = A \epsilon_d^{-0.2}$ ;随着围压变化,所得不同工况下的  $R^2$  均大于 0.95,说明该拟合曲线关系式可以较好地描绘洪积粉砂土的动应变幅与动弹性模量的关系。各围压下动弹性模量-动应变幅拟合曲线如图 11 所示。总体来说,洪积粉砂土的动弹性模量-动应变幅拟合情况较为理想,满足土样承受动荷载的稳定性要求,可作为路基填料。

3.3 阻尼比

3.3.1 含水率的影响

含水率分别为 6%、8%和 10%的洪积粉砂土样阻尼比  $\lambda$  与振动作用下累积塑性应变的关系如图 12 所示。可以看出,在含水率相同的情况下, $\lambda$  随着动应力幅值  $\epsilon_d$  的增加而逐渐增大。随着振动强度

表 3 洪积粉砂土的动弹性模量拟合参数  
Table 3 Fitting parameters of dynamic elastic modulus of alluvial silty sand

编号	围压/ kPa	含水 率/%	频率/ Hz	$A$	$B$	$R^2$
1	30	8	1	71.975 00	-0.224 87	0.988 43
2	50	8	1	104.486 00	-0.229 60	0.973 14
3	80	8	1	134.700 00	-0.216 17	0.986 43
4	30	8	1	105.336 30	-0.226 37	0.959 28
5	30	10	1	62.376 51	-0.258 59	0.979 44
6	30	6	3	105.678 00	-0.226 38	0.959 36
7	30	6	5	101.103 80	-0.233 29	0.960 86

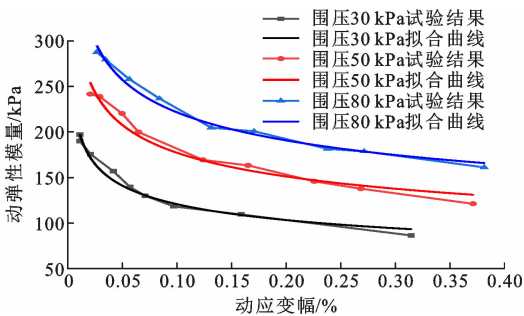


图 11 动弹性模量-动应变幅拟合曲线  
Fig. 11 Dynamic elastic modulus-dynamic strain amplitude fitting curve

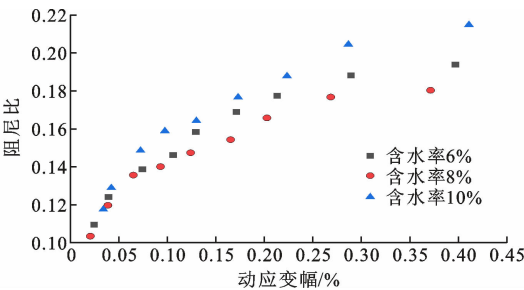


图 12 不同含水率下土样阻尼比-动应变幅关系  
Fig. 12 Damping ratio-dynamic strain amplitude relationship of soil samples under different water content

的增加和动应力水平的增大,达到一定的动荷载值时,土骨架结构被破坏,土颗粒之间的黏结作用丧失,土颗粒之间发生错位并产生摩擦,土样吸收外界振动的能量,因此洪积粉砂土对动载荷的阻尼作用会更大,阻尼比  $\lambda$  也会更大。当含水率为 10%时,阻尼比在同等条件下为最大值,阻尼比由大到小时的含水率依次为 10%、6%、8%。当含水率大于或小于最优含水率时,洪积粉砂土的阻尼比都有较大的增长,这是因为当试样含水率达到最优含水率时,试样土体颗粒之间接触也就更加紧密,空隙越少,因此波的传播路径更多,传播速度更快,波传播时所消

耗的能量也会更少<sup>[31]</sup>,所以表示能量耗散参数的阻尼比也就更小。当含水率较高时,滞回圈外扩,其面积增大,洪积粉砂土相较于低含水率时更容易产生塑性变形,阻尼比 $\lambda$ 也更大。

### 3.3.2 围压的影响

图13为不同围压下土样阻尼比-动应变幅关系,分析得出,阻尼比随着应变的增加呈现出增大的趋势,在不同围压下都有此现象。其原因为随着动荷载逐渐增大,土颗粒之间发生错位变化,土体之间的吸引力会受到损伤,土样内部结构发生挤压抵消更多动荷载作用下所产生的动能,阻尼比也随之增大。

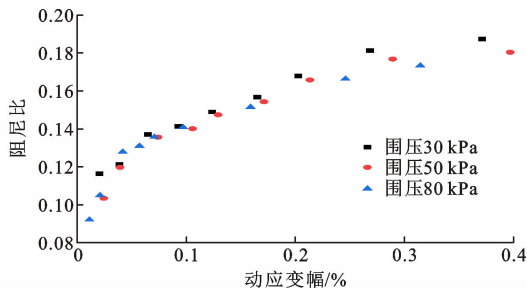


图13 不同围压下土样阻尼比-动应变幅关系

Fig. 13 Damping ratio-dynamic strain amplitude relationship of soil samples under different confining pressures

同时分析得出,在其他条件不变的情况下,对土样施加的围压越大,土样产生的阻尼比就越小。这是因为高围压状态下的土样能减少土体内部颗粒摩擦抵消的能量。

### 3.4 动强度曲线

#### 3.4.1 不同围压对动强度曲线的影响

动强度 $\tau_d$ 反映了洪积粉砂土抵抗动荷载破坏的能力,其计算公式为

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan(\varphi_d) \quad (4)$$

式中: $c_d$ 为黏聚力; $\sigma$ 为动应力; $\varphi_d$ 为内摩擦角。

在含水率为6%和8%的情况下,经受100次循环荷载的试样弹塑性应变之和达到5%时所需的动应力幅分别为横坐标 $\lg(N_f)$  ( $N_f$ 为破坏振次)对应的动强度值(图14)。当含水率 $w=8\%$ ,围压 $\sigma_3=30、50、80$  kPa时,试样的动强度分别为143.8、150.3、165.7 kPa。含水率 $w=6\%$ 时对应的动强度分别为137.2、148.9、164.3 kPa。由图14可知,围压对试验土样的动强度影响较大,围压增大会导致动强度增大。主要原因是围压增大会使得试样土颗粒间距离很小,导致土颗粒之间有较大的吸引能力,当围压越大时,土颗粒之间还会出现密实状态,增大

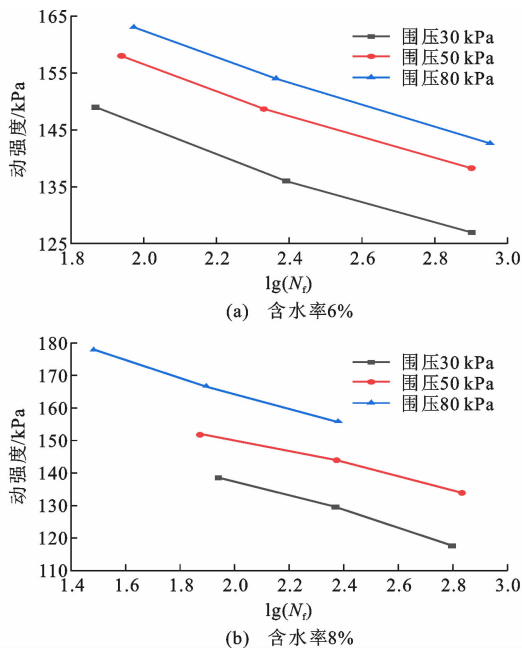


图14 不同围压下的动强度曲线

Fig. 14 Dynamic strength curve under different confining pressures

土颗粒之间的摩擦,从而增加了土样结构的稳定性。

#### 3.4.2 不同含水率对动强度曲线的影响

动强度与含水率之间的关系如图15、16所示,不难看出,含水率对洪积粉砂土的动态强度有显著影响,当土样含水率增加并超过最优含水率时,土颗粒之间结合水膜变厚,胶结作用逐渐减弱,凝聚力降低,动强度显著降低。总体而言,较高的含水率会显著降低洪积粉砂土的强度。

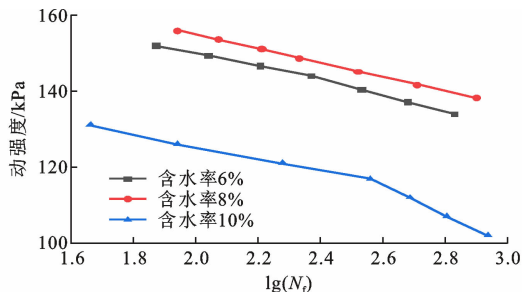


图15 不同含水率下的动强度曲线

Fig. 15 Dynamic strength curve under different water contents

#### 3.4.3 动强度-循环次数关系拟合

不同围压下动强度和循环次数的数学模型拟合关系式如式(5)所示,表4为试样在不同工况下的拟合参数。

$$\tau_d = Ae^{B \ln[\lg(N_f)]} \quad (5)$$

数学模型的 $R^2$ 都大于0.90,说明拟合公式(5)可以较好地描述达到破坏应变时洪积粉砂土的动应

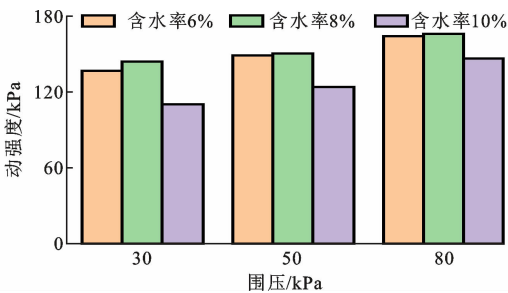


图 16 不同围压下动强度与含水率的关系

Fig. 16 Relationship between dynamic strength and water content under different confining pressures

表 4 模型拟合参数

Table 4 Model fitting parameters

编号	围压/kPa	含水率/%	A	B	R <sup>2</sup>
1	30	6	185.977 74	−0.435 78	0.973 28
2	50	6	183.743 36	−0.296 17	0.973 12
3	80	6	199.036 28	−0.281 60	0.999 13
4	30	8	186.851 03	−0.363 20	0.998 74
5	50	8	196.701 47	−0.330 82	1.000 00
6	80	8	204.418 70	−0.331 68	0.998 51
7	50	10	162.390 33	−0.387 91	0.924 60

力与循环次数的关系。含水率为 8% 的试样在不同围压下的动强度-循环次数拟合曲线如图 17 所示。

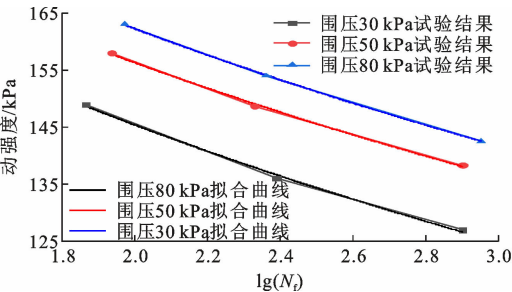


图 17 动强度-循环次数拟合曲线

Fig. 17 Fitting curve of dynamic strength-number of cycles

4 结 语

- (1)随着动荷载加载循环次数的增加,洪积粉砂土的累积塑性应变逐渐增大,加载初期累积塑性应变积累较快,但 1 000 次循环后保持相对稳定。此外围压和含水率对洪积粉砂土累积应变的影响较大,作用频率对洪积粉砂土累积应变的影响不显著。
- (2)洪积粉砂土的动弹性模量随着塑性变形的增加而发生衰减。围压和含水率对洪积粉砂土的动弹性模量影响较大,当围压越大且含水率接近最佳含水率时,动弹性模量越大。施加频率为 1、3 Hz 的动荷载作用时,动应力与动应变关系差距不明显。
- (3)洪积粉砂土的阻尼比随着应变的增加呈非

线性增长,阻尼比与弹性模量相比,在改变围压、含水率等变量的情况下,阻尼比与弹性模量呈现不同变化。洪积粉砂土的动强度与围压呈正相关关系,与循环次数呈负相关关系。

参考文献:

References:

[ 1 ] KOLMOGOROV G, KYCHKIN V I, ESIPENKO I. Dynamic response of pavement subjected to moving load[J]. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, 2015(5): 39-47.

[ 2 ] 李新明,路广远,张浩扬,等. 石灰偏高岭土改良粉砂土强度特性与微观机理[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):648-655.  
LI Xinming, LU Guangyuan, ZHANG Haoyang, et al. Strength characteristics and micro-mechanism of lime-metakaolin modified silty soil[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 648-655.

[ 3 ] 衣兰涛. 浅谈粉砂土填筑路基施工质量分析及控制措施[J]. 建筑工人, 2024, 45(8):36-39.  
YI Lantao. Discussion on construction quality analysis and control measures of silty sand filling subgrade [J]. Builders' Monthly, 2024, 45(8): 36-39.

[ 4 ] 笄雷娜. 水泥稳定粉砂土路基的应用技术分析[J]. 交通世界, 2024(16):56-58.  
ZAN Leina. Application technology analysis of cement stabilized silty sand subgrade [J]. Transpo World, 2024(16): 56-58.

[ 5 ] 何 进,刘树阁,杨广庆. 粉砂土路基施工质量 GeoGauge 检测有效性分析[J]. 工程建设与设计, 2022(21):62-64.  
HE Jin, LIU Shuge, YANG Guangqing. Effectiveness analysis of GeoGauge detection in silt soil subgrade[J]. Construction & Design for Engineering, 2022(21): 62-64.

[ 6 ] 郭 昆. 粉砂填筑路基施工工艺研究[J]. 住宅与房地产, 2021(24):193-194.  
GUO Kun. Study on construction technology of silt filling subgrade[J]. Housing and Real Estate, 2021 (24): 193-194.

[ 7 ] ZHANG Q, LENG W, ZHAI B, et al. Evaluation of critical dynamic stress and accumulative plastic strain of an unbound granular material based on cyclic triaxial tests[J]. Materials, 2021, 14(19): 5722.

[ 8 ] 倪雪倩,叶 斌. 砂土液化后液-固相变机理的单元试验与模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(1):16-22.  
NI Xueqian, YE Bin. Mechanical behavior and theo-



- retical simulation of post-liquefied sand in fluid-solid transition process[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(1): 16-22.
- [9] 娄乾星,陶铁军,田兴朝,等.基于HJC本构模型的石灰岩冲击破坏形态数值模拟方法研究[J].爆破,2022,39(4):71-79.
- LOU Qianxing, TAO Tiejun, TIAN Xingchao, et al. Research on numerical simulation method of limestone impact failure based on HJC constitutive model[J]. Blasting, 2022, 39(4): 71-79.
- [10] 翁磊,张皓量,张勇,等.低温下饱水粉砂岩的动态力学特性及本构模型研究[J].应用力学学报,2022,39(6):1096-1107,1134.
- WENG Lei, ZHANG Haoliang, ZHANG Yong, et al. Dynamic mechanical properties and the constitutive models of the water-saturated siltstones under frozen conditions[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(6): 1096-1107, 1134.
- [11] NI J, INDRARATNA B, GENG X Y, et al. Model of soft soils under cyclic loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 15(4): 04014067.
- [12] 田小草,李光耀,窦文利,等.干湿循环和动载作用下粉砂土累积变形研究[J].铁道工程学报,2023,40(9):1-7,15.
- TIAN Xiaoge, LI Guangyao, DOU Wenli, et al. Study on cumulative deformation of silty soil under dry-wet cycle and dynamic load[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(9): 1-7, 15.
- [13] 黄窈婷.高水位低路堤饱和粉砂土路基动三轴试验研究[D].南宁:广西大学,2017.
- HUANG Yaoting. Dynamic triaxial test research of saturated silt soil subgrade under the structure of low embankment with high water level[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [14] 董正方,王仁辉,曹献伟,等.黄泛区粉砂土动强度与抗液化强度试验研究[J].地震工程学报,2021,43(1):162-168,186.
- DONG Zhengfang, WANG Renhui, CAO Xianwei, et al. Experimental study of dynamic and anti-liquefaction strengths of silty sand in Yellow River flood area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 162-168, 186.
- [15] 来淑娜.地铁荷载下杭州饱和粉砂土动力特性试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.
- LAI Shuna. Research on dynamic properties of Hangzhou's saturated silty sands under metro vibration loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [16] 孟凡丽,吕筱,来淑娜.循环荷载下杭州粉砂土动孔压模型研究[J].浙江工业大学学报,2016,44(1):67-71.
- MENG Fanli, LÜ Xiao, LAI Shuna. Study on the model of dynamic pore water pressure in silt soil in Hangzhou under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(1): 67-71.
- [17] 张博.河南开封地区粉砂土动力特性共振柱试验研究[D].开封:河南大学,2019.
- ZHANG Bo. Experimental study on resonance column of dynamic characteristics of silty sand in Henan Kaifeng area[D]. Kaifeng: Henan University, 2019.
- [18] MONKUL M M, YAMAMURO J A. Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(6): 931-942.
- [19] 董正方,翟鹏飞,曾繁凯,等.黄泛区粉砂土动剪切模量和阻尼比试验研究[J].河南大学学报(自然科学版),2020,50(3):332-340.
- DONG Zhengfang, ZHAI Pengfei, ZENG Fankai, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of silty soil in the Yellow River flooded area[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, 50(3): 332-340.
- [20] 王勇,王艳丽.细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J].岩土力学,2011,32(9):2623-2628.
- WANG Yong, WANG Yanli. Study of effects of fines content on dynamic elastic modulus and damping ratio of saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2623-2628.
- [21] 胡小荣,蔡晓锋,李春博,等.南昌地铁饱和含泥砂土动力特性模拟分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(增1):157-173,195.
- HU Xiaorong, CAI Xiaofeng, LI Chunbo, et al. Numerical simulations of dynamic characteristics for saturated compacted clayey sands in Nanchang metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 157-173, 195.
- [22] 周金领,赵杰,王桂萱,等.地基土粉砂层动力特性分析试验研究[J].防灾减灾学报,2011,27(2):1-4.
- ZHOU Jinling, ZHAO Jie, WANG Guixuan, et al. Laboratory study on dynamic properties of silty sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2011, 27(2): 1-4.
- [23] 崔高航,席晨,程卓,等.粉煤灰掺量对含黏粒粉砂土力学性能影响[J].科学技术与工程,2021,21(34):14688-14695.

CUI Gaohang, XI Chen, CHENG Zhuo, et al. Influence of fly ash content on mechanical properties of clay-containing silt soil[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(34): 14688-14695.

[24] 王晶晶. 改良粉砂土路基动力特性研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.

WANG Jingjing. Study on dynamic characteristics of improved silty soil subgrade[D]. Kaifeng: Henan University, 2019.

[25] 张云龙, 周刘光, 王 静, 等. 冻融对粉砂土力学特性及路堤边坡稳定性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1531-1538.

ZHANG Yunlong, ZHOU Liuguang, WANG Jing, et al. Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty sand and subgrade slope stability[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(5): 1531-1538.

[26] 孙 静, 公茂盛, 熊宏强, 等. 冻融循环对粉砂土动力特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 747-754.

SUN Jing, GONG Maosheng, XIONG Hongqiang, et al. Experimental study of the effect of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 747-754.

[27] 朱成浩. 季冻区沿江粉砂动力学特性试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.

ZHU Chenghao. Experimental study of the dynamic characteristics of silt along the river in the seasonal frozen area[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[28] 郭婷婷. 固结比对粉质粘土动力学特性影响的试验研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2729-2734.

GUO Tingting. Testing study of effects of consolidation ratio of soils on dynamic characteristics[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2729-2734.

[29] 刘建坤, 曾巧玲, 侯永峰. 路基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

LIU Jiankun, ZENG Qiaoling, HOU Yongfeng. Subgrade engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.

[30] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept[J]. Transportation Research Record, 2001, 1757(1): 75-81.

[31] 李广信. 高等土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016.

LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.