

# 贮灰场沉积粉煤灰动力特性试验研究

刘少辉, 梁志超, 李俊生, 成勇龙, 李伟

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 贮灰场沉积粉煤灰的动力特性对评价挡灰坝在地震动荷载作用下的稳定性至关重要。通过动三轴仪对两种不同干密度的沉积粉煤灰进行了三轴试验, 探究了沉积粉煤灰的动应力-动应变关系、动模量、阻尼比、动孔压和动强度的变化规律。研究结果表明: 不同干密度的粉煤灰动应力-动应变曲线基本呈双曲线型, 与土的应力-应变曲线相似, 呈弱硬化型。干密度大的试样相应的动模量越大。相同干密度下, 不同围压下的阻尼比规律不明显, 但阻尼比随着动应变的变化趋势符合一般土常见的规律。动应力越大, 试样破坏所需的振动次数越小, 且动剪应力比也越大。动孔压水平随振次的变化不大, 且与振次比的关系可以归一化。同时, 得到了两种沉积粉煤灰的总强度指标和有效应力指标。

**关键词:** 沉积粉煤灰; 动模量; 阻尼比; 动强度; 动孔压

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)05-0052-06

## Experimental Study on Dynamic Characteristics of Fly Ash Deposited in Ash Storage Field

LIU Shaohui, LIANG Zhichao, LI Junsheng, CHENG Yonglong, LI Wei

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The dynamic characteristics of fly ash deposited in the ash storage yard is very important to evaluate the stability of the ash dam under the action of ground motion loads. In this paper, a triaxial test was carried out on two different dry densities of deposited fly ash with a dynamic triaxial instrument, and the dynamic stress-dynamic strain relationship, dynamic modulus, damping ratio, dynamic pore pressure and dynamic strength of the deposited fly ash were explored. The research results show that the dynamic stress-dynamic strain curves of fly ash with different dry densities are basically hyperbolic, which is similar to the stress-strain curve of soil, showing a weak hardening type. A specimen with a higher dry density corresponds to a larger dynamic modulus. Under the same dry density, the law of damping ratio under different confining pressures is not obvious, but the change trend of damping ratio with dynamic strain conforms to the common law of general soil. The greater the dynamic stress, the smaller the number of vibrations required for specimen failure, and the greater the dynamic shear stress ratio. The dynamic pore pressure level does not change much with the vibration frequency, and the relationship with the vibration frequency ratio can be normalized. At the same time, the total strength index and effective stress index of two kinds of deposited fly ash are obtained.

**Keywords:** sedimentary fly ash; dynamic modulus; damping ratio; dynamic strength; dynamic pore pressure

粉煤灰是一种以燃煤为主的发电厂排放的主要废弃料, 由于其特殊性, 应该正确合理的处理粉煤灰以达到最小的环境污染和最大的再利用价值<sup>[1]</sup>。近些年来, 我国的粉煤灰贮存量逐年增加, 目前国内处理粉煤灰的方法主要有两种: 一种是将粉煤灰

与其他物质进行混合用于工程上, 达到循环利用的目的。另一种是将粉煤灰进行贮灰场储存。为了更进一步的节省费用, 大部分直接采用灰渣填筑子坝来扩大贮灰场的规模, 并且粉煤灰堆积的高度随着时间的推移逐渐增大, 其在降雨作用下, 容易发生失

稳,更危险的是在地震动荷载作用下,灰坝会发生溃坝及不良的地质灾害<sup>[2-4]</sup>。

近些年来,国内外许多学者对贮灰场的粉煤灰进行大量的试验<sup>[5-10]</sup>。孙恩吉等<sup>[11]</sup>发现粉煤灰的颗粒存在不均匀性,干密度越小,渗透系数越大。刘铁军等<sup>[12]</sup>通过室内试验得到了粉煤灰的最大干密度和最优含水率,并发现随着含水率的增大,黏聚力和内摩擦角均减小。但随着压实度的增大,强度指标均增大。余芳涛等<sup>[1]</sup>对贮灰场子坝冲填粉煤灰进行了一系列动力试验,研究了冲填粉煤灰的动力变形和强度特性。李明等<sup>[13]</sup>通过对粉煤灰进行固结排水和固结不排水的动三轴试验,发现密度对液化区面积有很大的影响。陈建斌等<sup>[14]</sup>以实际粉煤灰坝为背景,对灰坝进行了动力特性评价。李永乐等<sup>[15]</sup>对原状和击实粉煤灰进行了动三轴试验,得出了动强度参数和动剪切模量及阻尼比参数。以上学者对粉煤灰静动力特性进行了深入有益的研究,同时得到了很多有价值的结论,但针对贮存场中不同密度沉积混合粉煤灰的动力特性研究相对较少。由于目前灰坝堆积较高,库容较大,在地震动荷载作用下,安全性至关重要,因此,系统地研究粉煤灰的动力特性具有重要意义。

本文以某电厂贮灰场沉积粉煤灰为研究对象,研究了不同干密度下重塑饱和粉煤灰动应力-应变、动模量、阻尼比、动孔压和动强度;探讨了干密度、围压和循环振次对上述动力特性指标的影响规律,得到了不同循环振次下沉积粉煤灰的总动强度指标和有效动强度指标,为该贮灰场运行期间的动力稳定性分析提供依据和参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及制备

(1) 试验用料。试验用料取自靖远某贮灰场的沉积灰。该初期灰场拟在灰面达到设计标高时加高一级子坝,作为本期工程初期灰场;设计子坝坝顶标高 1 603 m 时,新增库容约  $375.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;形成总库容  $897 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,满足电厂二、三期总容量  $4 \times 300 \text{ MW}$  机组贮灰约 7 a。子坝拟采用水力冲填法,冲填材料为库内的沉积灰渣;子坝坝高初拟为 4.0 m,坝顶高程 1 603.00 m,坝顶宽度 5 m,上下游边坡均初拟为 1:3.5,上游坡面设土工膜防渗,坝体表面采用干砌石护坡。沉积灰场共分 2 个灰场,编号为 1 号和 2 号,其中 1 号灰场内共布设三个断面、8 个探井,2 号灰场内共布设四个断面、11 个探井。探井深

度为 0.5 m ~ 4.5 m。所取沉积粉煤灰物理性质指标见表 1。粉煤灰的比重 2.20 ~ 2.64 之间,颗粒以粉粒为主,粉粒含量在 39.0% ~ 91.0% 之间。

表 1 沉积粉煤灰的物理性质指标

平均含水率 $w/\%$	最大干密度 $\rho_d$ $/(g \cdot cm^{-3})$	最小干密度 $\rho_d$ $/(g \cdot cm^{-3})$	比重 $G_s$	平均渗透系数 $k_s$ $/(cm \cdot s^{-1})$
44.03	1.57	1.07	2.20 ~ 2.64	$4.16 \times 10^{-4}$

(2) 试样制备与方法。所有试样均采用压样法制样,试样尺寸为直径 3.91 cm,高 8 cm 的圆柱样,按设计要求的干密度及含水率计算出试验所需湿土重量,分五次压入制样器中,每层刨毛,所制备试样的干密度之间误差不超过  $0.02 \text{ g/cm}^3$ 。饱和试样采用抽气饱和方法进行饱和,经测定饱和度达 95% 以上。

### 1.2 试验方案

试验制样干密度为  $1.18 \text{ g/cm}^3$  和  $1.28 \text{ g/cm}^3$  (简称为 1#,2#)。固结应力比  $K_c = \sigma_{1c}/\sigma_{3c} = 1.5$ ,循环振次  $N_f$  取 10、20 和 30。围压  $\sigma_{3c}$  取 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa。试验采用振动波形为正弦波,振动频率为 1 Hz。所有试样均为饱和试样,以孔隙水压力完全消散作为固结稳定标准。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 沉积粉煤灰动应力-动应变特性

图 1 为在偏压固结条件不同固结压力下 1#和 2#沉积粉煤灰的动应力-动应变关系曲线,从图中可以看出,不同干密度的粉煤灰动应力-动应变曲线基本呈双曲线型,与土的应力-应变曲线相似,粉煤灰动应力-动应变曲线呈弱硬化型。动应变发展前期,动应力增大趋势明显,随着动应变逐渐增大,动应力趋于稳定。同时,随着围压的增大,曲线逐渐上移,峰值动应力也越大。相同固结压力下,干密度的增大,动应力也表现出增大的趋势。这也说明,沉积粉煤灰的压密程度决定了其动应力的大小。

### 2.2 沉积粉煤灰动模量与阻尼比

#### 2.2.1 动模量

由于  $\sigma_d - \varepsilon_d$  ( $\sigma_d$  为动应力,  $\varepsilon_d$  为动应变) 关系近似符合如下的双曲线关系,故采用式(1)对动应力-动应变曲线进行转化,其中  $E_d = \sigma_d/\varepsilon_d$ 。

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

式中: $a, b$  为拟合参数。 $a = 1/E_{\max}$ ,  $b = 1/\sigma_{\text{dmax}}$ 。

图 2 为 1#和 2#沉积粉煤灰的  $1/E_d - \varepsilon_d$  关系曲

线,从图 2 中看出,  $1/E_d - \varepsilon_d$  关系曲线呈线性关系,随着围压的增大曲线下移,说明动模量随着围压逐渐增大。

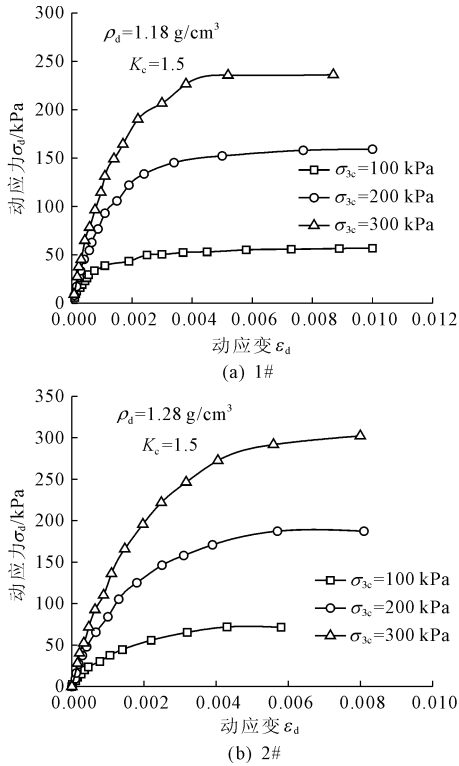


图 1 不同干密度沉积粉煤灰动应力 - 动应变关系曲线

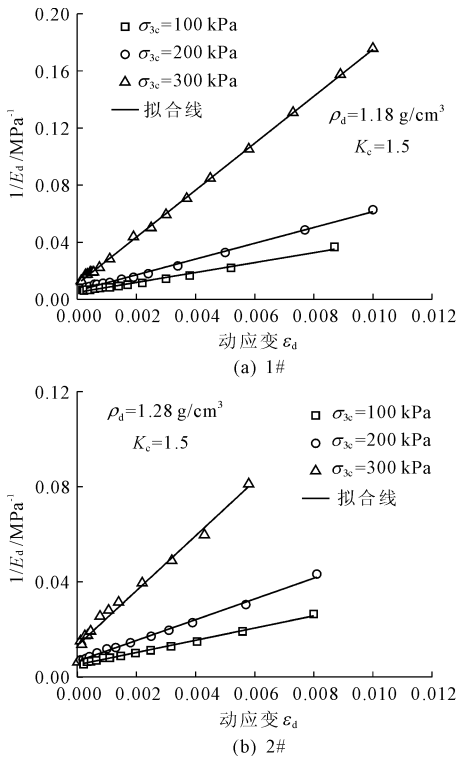


图 2 不同干密度沉积粉煤灰  $1/E_d - \varepsilon_d$  关系曲线

对比两种不同干密度的结果看出,干密度对动模量有明显的影 响,相同固结围压下,随着干密度的增大,动模量在增大。同时,将拟合直线的参数汇于表 2,从表中更能直接看出,随着固结围压增大,最大动模量与动应力增大,相同固结压力下,干密度越大,最大动模量与动应力也随之增大。

表 2 沉积粉煤灰的模型拟合参数

编号	$\sigma_{3c}$ /kPa	$a$ / $10^{-3} \text{MPa}^{-1}$	$b$ / $10^{-2} \text{kPa}^{-1}$	$E_{\max}$ /MPa	$\sigma_{d\max}$ /kPa
1#	100	13.2	1.64	75.7	60.9
	200	6.6	0.53	151.5	188.7
	300	5.2	0.35	192.3	285.7
2#	100	11.1	1.15	76.3	87.0
	200	6.1	0.43	163.9	232.6
	300	4.8	0.26	208.3	384.6

### 2.2.2 阻尼比

图 3 为不同干密度沉积粉煤灰的阻尼比与动应变关系曲线,从图中可以看出,阻尼比随着动应变的增大先缓慢增大再迅速增大,最后趋于稳定。相同干密度下,不同围压下的阻尼比规律不明显,但阻尼比随着动应变的变化趋势符合一般土常见的规律。对比 1#和 2#,可以看出,相同固结围压下,干密度越大,阻尼比越小。

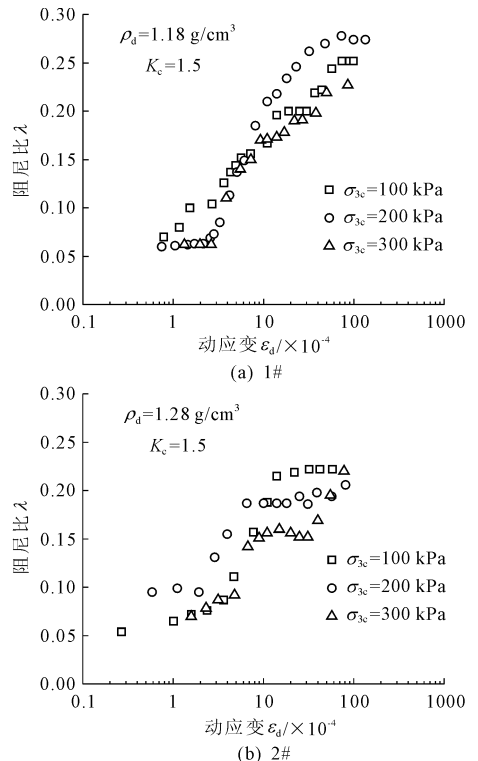


图 3 不同干密度沉积粉煤灰阻尼比曲线

### 2.3 沉积粉煤灰动强度特性

图4为不同干密度沉积粉煤灰动强度曲线,按综合应变等于5%为破坏标准。从图中可以看出,随着动应力不断增大,各试样的破坏振次逐渐减小,当动应力较小时,试验达到破坏时所承受的振次越多。试样的动应力随着固结围压的增大而增大,相同固结围压下,干密度越大,动应力越大。

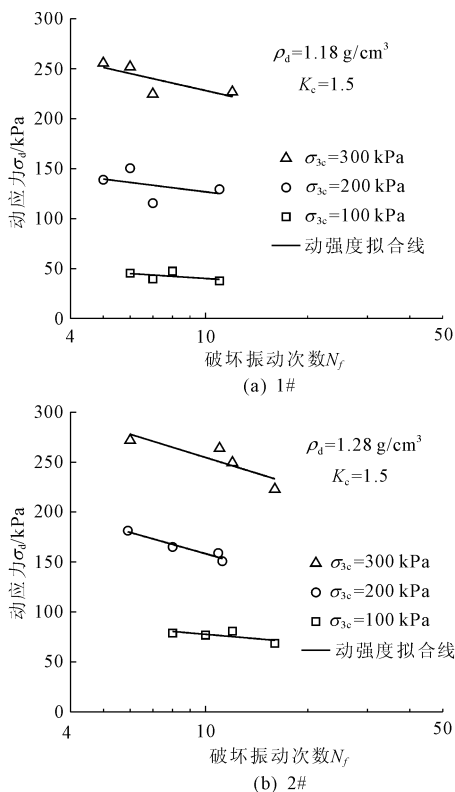


图4 不同干密度沉积粉煤灰动强度曲线

将2种沉积粉煤灰的动强度试验结果表示为动剪应力与破坏振次的关系,图5为不同干密度沉积粉煤灰的动剪应力比曲线,从图中可看出,在对数坐标里,动剪应力比与破坏振动次数呈线性关系,2#粉煤灰在三种不同固结围压下的动剪应力比分布在一个小范围内,相比于1#粉煤灰,其动剪应力比受固结围压影响不大,近似可以归一化。

### 2.4 沉积粉煤灰动孔压特性

#### 2.4.1 动孔压水平 $u_{df}/\sigma_{3c}$ 与破坏振次 $N_f$ 的关系

在同一试验条件(相同的密度、固结应力比、周围压力)下,根据不同动应力作用下动孔压发展过程中试样达到相应破坏标准时的动孔压值(残余孔压值),做出动孔压水平  $u_{df}/\sigma_{3c}$  与破坏振次  $N_f$  的关系见图6,从图6中可以看出,  $u_{df}/\sigma_{3c}$  随破坏振次  $N_f$  的增大呈缓慢增大或基本不变的趋势,不同固结围压  $\sigma_{3c}$  下  $u_{df}/\sigma_{3c} - N_f$  关系分布在较窄的范围内,为了

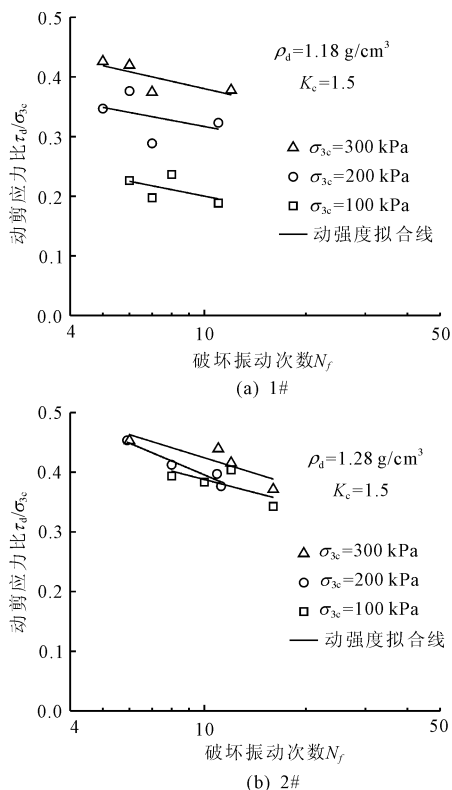


图5 不同干密度沉积粉煤灰动剪应力比曲线

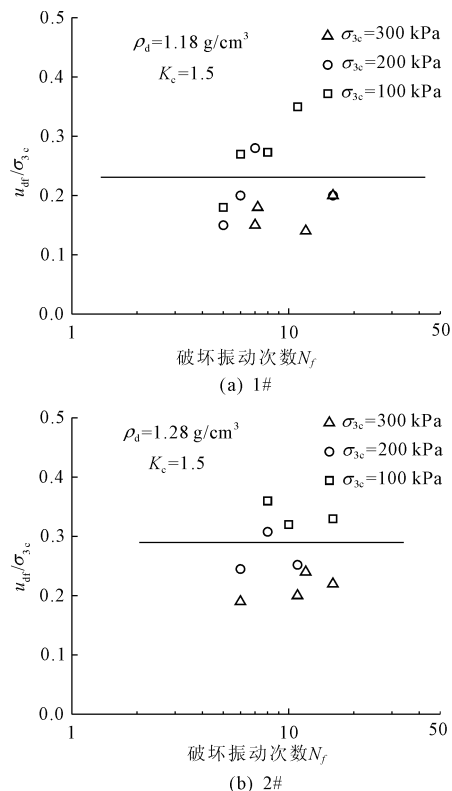


图6 不同干密度沉积粉煤灰动孔压比与破坏振次关系曲线

简便起见,可以近似地认为,  $\sigma_{3c}$ 、 $N_f$  对值  $u_{df}/\sigma_{3c}$  没

有影响。根据图 6 确定出不同密度、不同围压下动孔压水平  $u_{df}/\sigma_{3c}$  值见表 3。从表 3 可以看出,在偏压固结( $K_c = 1.5$ )条件下,破坏振次  $N_f \leq 30$  时,当用综合动应变等于 5% 作为破坏标准,1#和 2#粉煤灰的动孔压水平  $u_{df}/\sigma_{3c}$  平均值分别为 0.22、0.30。

#### 2.4.2 动孔压水平 $u_{df}/\sigma_{3c}$ 与破坏振次 $N/N_f$ 的关系

根据试验结果绘出不同试验条件下孔压比  $u_{df}/\sigma_{3c}$  与振次比  $N/N_f$  关系如图 7 所示(由于篇幅有限,只给出了一个围压下结果),可以看出,固结围压和固结应力比相同时,不同动应力下  $u_{df}/\sigma_{3c} - N/N_f$  关系试验点分布在较窄范围,可以近似地归一。不同试验条件下  $u_{df}/\sigma_{3c} - N/N_f$  关系皆可以用下列表达式描述:

$$\frac{u_{df}}{\sigma_{3c}} = 1 - e^{-\theta(N/N_f)} \quad (2)$$

式中: $\theta$  为试验参数,确定出不同试验条件下的  $\theta$  值见表 3。

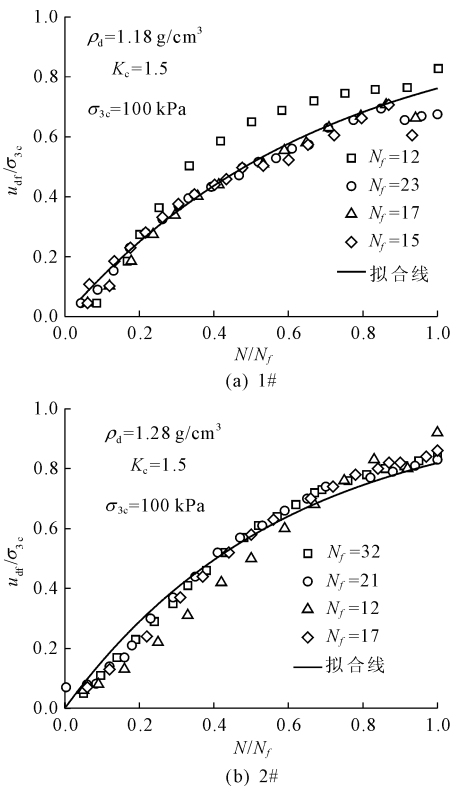


图 7 不同干密度沉积粉煤灰  $u_{df}/\sigma_{3c} - N/N_f$  关系曲线

对二种粉煤灰样和一定破坏振次  $N_f$  的情况,可以从图 4 中某一确定的  $\sigma_{3c}$  时  $\sigma_d$  与破坏振次  $N_f$  关系曲线图查得在  $N_f = 10, 20$ 、和 30 次对应的破坏动应力  $\sigma_d$ ,并由  $K_c$  算出  $\sigma_{3c}$  相对应的轴向固结应力  $\sigma_{1c}$ ,即可得到破坏条件下的主应力状态  $\sigma_{3d} = \sigma_{3c}$ ,

$\sigma_{1d} = \sigma_{1c} + \sigma_d$ ,据此主应力状态绘出摩尔圆。根据摩尔圆包络线的截距和斜率即可确定动力作用下土的总应力动强度指标  $c_d$  和  $\varphi_d$ ,具体值见表 3。为了求得土的有效应力动强度指标  $c'_d$  和  $\varphi'_d$ ,可以在按上述方法步骤求出  $\sigma_d$  后,再利用  $u_{df}/\sigma_{3c} - N_f$  试验曲线(见图 6)求出与破坏振次  $N_f$  相应的  $u_{df}$ ,再求出破坏条件下的有效主应力  $\sigma'_{1d} = \sigma_{1c} + \sigma_d$  和  $\sigma'_{3d} = \sigma_{3c} - u_d$ ,可以对不同的  $\sigma_{3c}$  分别作出有效应力摩尔圆。由它们的强度包线,求出动力条件下土的有效应力强度指标  $c'_d$  和  $\varphi'_d$  见表 4。从表中可以看出,不同循环振次下,两种粉煤灰样的动黏聚力为 0,动内摩擦角变化不大。2#粉煤灰动内摩擦角略大于 1#粉煤灰。有效动黏聚力也为 0,密度大的试样动有效内摩擦角较大。

表 3 沉积粉煤灰的动孔压结果

编号	$\sigma_{3c}$ /kPa	$\theta$	破坏振次 $N_f$	破坏动孔 压水平
1#	100	1.45		
	200	1.25	10、20、30	0.22
	300	1.25		
2#	100	1.65		
	200	1.45	10、20、30	0.30
	300	1.15		

## 3 结 论

本文对某电厂贮灰场沉积粉煤灰进行了室内动三轴试验,研究了其动应力应变、动模量、阻尼比、动孔压和动强度特性。主要得到以下结论:

(1) 不同干密度的粉煤灰动应力 - 动应变曲线基本呈双曲线型,与土的应力 - 应变曲线相似,粉煤灰动应力 - 动应变曲线呈弱硬化型。

(2) 干密度对动模量有明显的影响,干密度大的试样,动模量较大。阻尼比随着动应变的增大先缓慢增大再迅速增大,最后趋于稳定。相同固结围压下,干密度大的试样阻尼比较小。

(3) 试样的动应力随着固结围压的增大而增大,相同固结围压下,动应力越大,试样破坏所需的振动次数越小,且动剪应力比也越大。

(4) 动孔压水平随振次的变化不大,且与振次比的关系可以归一化。沉积粉煤灰的总动黏聚力和有效动黏聚力为 0,总动内摩擦角小于有效动内摩擦角。

研究结果对于评价此贮灰场在地震荷载下的动稳定性分析具有重要参考和指导意义。

表4 沉积粉煤灰动三轴试验结果

试样编号	破坏振次 $N_f$	固结周围压力 $\sigma_{3c}/\text{kPa}$	破坏动应力 $\sigma_{df}/\text{kPa}$	破坏动剪应力比 $\tau_{df}/\sigma_{3c}$	动黏聚力 $c_d/\text{kPa}$	动内摩擦角 $\varphi_d/(\circ)$	有效动黏聚力 $c'_d/\text{kPa}$	有效动内摩擦角 $\varphi'_d/(\circ)$
1#	10	100	41.1	0.206				
		200	130.5	0.326	0	22.0	0	25.3
		300	230.2	0.384				
	20	100	34.1	0.170				
		200	122.8	0.307	0	20.3	0	24.4
		300	205.8	0.343				
	30	100	30.0	0.150				
		200	118.3	0.230	0	20.0	0	23.8
		300	191.5	0.319				
2#	10	100	73.5	0.368				
		200	158.8	0.397	0	23.4	0	29.5
		300	254.9	0.425				
	20	100	61.0	0.305				
		200	133.5	0.334	0	21.9	0	27.6
		300	225.2	0.375				
	30	100	53.6	0.268				
		200	118.6	0.297	0	21.1	0	26.9
		300	207.7	0.346				

## 参考文献:

- [1] 余芳涛,王松鹤,李军琪,等. 贮灰场子坝粉煤灰动力特性试验研究[J]. 地震工程学报,2018,40(5):151-158.
- [2] Chanw H, Mazlee M N, Ahmad Z A, et al. Effects of fly ash addition on physical properties of porous clay - fly ash composites via polymeric replica technique[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(2): 794-803.
- [3] Kumar H, Mishra M K. Optimization and evaluation of fly ash composite properties for geotechnical application [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(6):3713-3726.
- [4] 丁家平. 贮灰库渗流控制及三维等参元渗流数学模型的应用[J]. 岩土工程学报,1991,13(4):41-50.
- [5] 郭江涛,张爱军,李 鹏. 沉积粉煤灰的强度特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(3):51-54.
- [6] 董 雷. 掺土粉煤灰动力特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009:5-12.
- [7] 李 振,骆亚生,邢义川. 动扭剪荷载作用下粉煤灰动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):3080-3086.
- [8] 段 涛,张爱军,李大可,等. 基于 Underflow-3D 的灰坝渗流计算[J]. 人民黄河,2009,31(4):111-113.
- [9] 陈 武,朱志铎. 粉煤灰增强废弃混凝土聚合物试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):189-194,201.
- [10] 张桂荣,罗紫婧,邵 勇,等. 水泥、粉煤灰改良细砂土的工程特性与改良机理[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):128-132.
- [11] 孙恩吉,张兴凯,李全明. 火电厂粉煤灰力学特性试验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(3):29-33.
- [12] 刘铁军. 粉煤灰用作路堤填料的力学特性试验研究[J]. 粉煤灰综合利用,2018(6):62-65.
- [13] 李 明,梁 力,赵 军,等. 大型贮灰坝动力反应及液化分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2007(12):1766-1769.
- [14] 陈建斌,周立运. 粉煤灰坝动力特性试验研究[J]. 岩土力学,2005(3):437-440.
- [15] 李永乐,陈 宇,李敏芝,等. 粉煤灰的动力特性试验及震动液化研究[J]. 华北水利水电学院学报,2002(4):64-67.