

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):1018-1025.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1018

SHE Fangtao, WANG Songhe, LI Junqi, et al. Experimental Study of Dynamic Characteristics of Fly Ash in Ash Storage Dams [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 1018-1025. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1018

贮灰场子坝粉煤灰动力特性试验研究

余芳涛^{1,2}, 王松鹤^{1,2}, 李军琪¹, 丁九龙^{1,2}, 王 强³

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;
3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 贮灰场子坝冲填粉煤灰的动力特性是评估挡灰坝在地震作用下动力稳定性的关键因素。为探究冲填粉煤灰的动力变形和强度特性,利用液压控制振动三轴试验仪测试饱和和沉积灰和冲填灰两类试样在偏压固结条件下的动应力-动应变关系、动强度、阻尼比和动孔隙水压力。结果表明:试样骨干曲线均表现出应变硬化特征,可近似描述为双曲线型关系。此外,循环振次增大导致试样动强度降低,且主要与动黏聚力降低有关,受内摩擦角影响较小。双对数坐标轴下,无量纲处理后的阻尼比与动剪切模量近似呈线性关系,且与围压关系不显著。不同围压下动孔压水平随破坏振次增大仅在较窄范围内变化,为简便计算,可忽略围压和循环振次对动孔压水平的影响。据此,可采用 Finn 公式描述偏压固结下粉煤灰试样的动孔隙水压力特征。

关键词: 粉煤灰; 动模量; 阻尼比; 动孔隙水压力

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)05-1018-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1018

Experimental Study of Dynamic Characteristics of Fly Ash in Ash Storage Dams

SHE Fangtao^{1,2}, WANG Songhe^{1,2}, LI Junqi¹, DING Jiulong^{1,2}, WANG Qiang³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The dynamic behavior of filling fly ash in ash storage dams is critical for evaluating the dynamic stability of ash retention dams under seismic action. In order to investigate the dynamic deformation and strength characteristics of filling fly ash, the dynamic stress-strain relationship, dynamic strength, damping ratio, and dynamic pore pressure of two types of specimens, i.e., saturated sedimentary ash and flushing ash, were tested by a hydraulic control dynamic triaxial apparatus under conditions of anisotropic consolidation. Results showed that the backbone curves of specimens showed a strain-hardening tendency, which can be an approximate hyperbolic relationship. In addition, the increase in vibration cycles will cause a decrease in dynamic sample strength, and is mainly related to the decrease in the dynamic cohesion rather than the internal friction angle. In the double logarithmic axis, the damping ratio

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608442, 51778528, 51408486); 陕西省黄土力学与工程重点实验室基金(LME201802)

第一作者简介: 余芳涛(1983-), 安徽安庆人, 讲师。E-mail: shefangtao@xaut.edu.cn.

o after dimensionless treatment showed a linear relationship with the dynamic shear modulus, but was not closely related to the confining pressure. Under differing confining pressures, the dynamic pore water pressure changed only in a narrow range with increasing vibration cycles. For convenience of calculation, the influence of confining pressure and vibration cycle on the dynamic pore pressure can be neglected. Accordingly, the Finn formula can be used to describe the dynamic pore water pressure of fly ash specimens under anisotropic consolidation.

Keywords: fly ash; dynamic modulus; damping ratio; dynamic pore pressure

0 引言

粉煤灰作为燃煤的一种附加产物,因其化学成分的特殊性,处理方法不同于其他的工业废渣,应根据其用途选择恰当的处理方法,以达到环境污染最小值和废物利用的最大值。目前国内外处理粉煤灰主要有综合利用和贮灰场储存两种方法。虽然粉煤灰的利用率逐年增加,但总体来说仍然不高,以贮灰场储存为主。而这种方式也面临着一系列环境污染问题,比如贮灰场中裸露粉煤灰在风力作用下向大气逸散所导致的空气污染,粉煤灰中有害化学物质淋滤后污染周围土壤及地下水体等。更重要的是,贮灰场中粉煤灰堆积到一定高度后,除可能在暴雨作用下发生失稳外,其在地震荷载作用下可能诱发严重的地质灾害。

国内外学者在贮灰场粉煤灰动力特性方面已经开展了大量工作。李明等^[1]通过振动三轴试验,分析了粉煤灰固结排水和固结不排水两种条件下的应力应变特征,发现相对密度对液化区面积有很大影响。王桂萱等^[2]通过对坝体进行动力有效应力分析,确定了抗滑动稳定安全系数,发现沿坝高与坝坡的加速度分布系数差异较大,坝体基频随着坝体软化而不断降低。郭佩玖等^[3]发现粉煤灰的动应力和动应变具有双曲线关系,且动模量与有效应力有非常密切的关系。胡颂嘉^[4]通过灰坝液化和动力稳定性分析,发现即使没有液化区也会在地震惯性力作用下引起灰坝坝坡动力失稳。Zhou等^[5]通过计算粉煤灰坝的加速度、动剪应力和孔隙水压力,发现最大孔隙水压力比发生在坝顶附近且这些区域对液化更敏感。董雷^[6]发现掺土粉煤灰的动应力-应变关系符合双曲线型,且掺土越多,产生同一剪应变所对应的动剪应力也越大;同时还发现固结围压越大,含水率越高,动应变随着动应力的增加而增大,且动强度随粉煤灰掺量的增加而增大。张昭等^[7]从地震液化与动模量弱化特性角度研究了粉煤灰的动力特性。李振等^[8]根据动扭剪荷载试验研究了粉煤灰的动力特性。以上学者对于粉煤灰动力研究进行了有益的探索,但对于贮灰

场粉煤的研究相对较少,并且因其堆积较高,一旦遇到地震等作用,其安全性不容忽略。因此有必要对其动力特性进行系统研究。

本文拟以贮灰场挡灰坝中冲填灰和沉积灰两类粉煤灰为研究对象,采用动三轴试验仪测试粉煤灰试样的动应力-动应变、动强度、阻尼比和动孔隙水压力特征,研究围压、循环振次等对上述特征指标的影响,以期对贮灰场设计和动力稳定性评价提供基本依据。

1 试验方案

1.1 贮灰场粉煤灰的基本物理指标

试验所用粉煤灰取自宁夏回族自治区某贮灰场。该贮灰场实测三级子坝坝顶宽度在4.9~5.3 m间,平均宽度为5.1 m,其下游坡比介于1:2.9~1:3.2,平均坡比为1:3.05;实测二级子坝坝顶宽度在4.7~5.8 m间,平均宽度为5.25 m,下游坡比介于1:2.8~1:3.5,平均坡比为1:3.15。坝体表面采用干砌石护坡。二级、三级子坝坝顶各布置1个钻井,深度6~12 m,并进行沉积灰取样;库内干滩面上布置2个人工探井,深度3~4 m,采集冲填灰样。

对所取粉煤灰首先进行室内试验基本物理指标试验,包括比重试验、击实试验、颗粒分析等。试验均按《土工试验方法标准(GB/T 50123-1999)》和《土工试验规程(SL 237-1999)》操作。这里以库内探井1、库内探井2、二级子坝以及三级子坝的粉煤灰土样为测试对象,结果如表1所列。由表1可知,粉煤灰主要由细颗粒组成,砂粒含量在47.9%~71%,粉粒含量在24.5%~45.1%间,黏粒含量在2.9%~7%。不均匀系数在5.67~10.56,曲率系数在1.02~2.43。最大干密度在1.10~1.13 g/cm³间,平均值为1.12 g/cm³;干密度相对较低,最优含水率在36.6%~40.4%间,平均值为38.5%,比重在2.25~2.18间,平均为2.24。

1.2 振动三轴试验方案

采用压样法制备试样,试样直径为3.91 cm,高8.0 cm。按要求的干密度及含水量计算出试验所需湿土重,五等分后用特制的压样模分层压实。每层压

实后,将土面刨毛,再装下一层并压实,以便层间接触良好,保证试样的均匀性。采用抽气饱和方法对试样进行饱和。将制备好的试样装入饱和器内,再置入抽

气缸内进行抽气,当真空度接近一个大气压后继续抽 1 小时,然后注入清水,待饱和器完全被淹没在水中后,解除真空,静置一昼夜后待用。

表 1 粉煤灰基本物理性质表

Table 1 Basic physical properties of the fly ash

取样点	颗粒组成/%			C_u	C_c	C_s	ρ_{dmax} ($g \cdot cm^{-3}$)	$w_{op}/\%$
	2~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm					
库内断面 1	71.0	24.5	4.5	8.24	1.43	2.18	1.10	36.6
库内断面 2	67.1	28.0	4.9	7.50	1.41	2.28	1.13	37.5
二级子坝	68.6	28.5	2.9	5.67	1.02	2.23	1.12	39.4
三级子坝	47.9	45.1	7.0	10.56	1.78	2.25	1.11	40.4

粉煤灰的动力特性研究是在液压控制振动三轴仪上进行,以研究不同试验条件下的动强度、动孔压、阻尼比及动模量等动力学参数。试验材料为电厂灰场的沉积灰和冲填灰。制样控制干密度为 0.88、0.98、1.08 和 1.18 g/cm³ (以下简称为 1[#] 样, 2[#] 样, 3[#] 样、4[#] 样),其中 1、2[#] 样代表沉积灰,3、4[#] 样代表冲填灰。试样直径 3.91 cm,高度为 8.0 cm,按要求的干密度及含水量采用分 5 层击样法进行制样。所制备试样的干密度误差不超过 0.02 g/cm³。采用抽气饱和方法对试样进行饱和,并保证饱和度达 95% 以上。固结应力比 $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c} = 1.5$,围压

$\sigma_{3c} = 100、200$ 和 300 kPa,以孔隙水压力完全消散作为固结稳定标准。偏压固结完成后,关闭排水开关,再对每个试样分级施加逐级增长的动应力,每级振动 5 次,用计算机采集动应力、动应变。试验采用振动波形为正弦波,振动频率为 1 Hz,考虑使用 3 种循环振次 N_f ,即 10、20 和 30。

2 试验结果分析

2.1 动应力动应变特征

图 1 给出了偏压固结条件下试样在不同固结压力下的动应力-动应变骨干曲线。从图中可以看出,

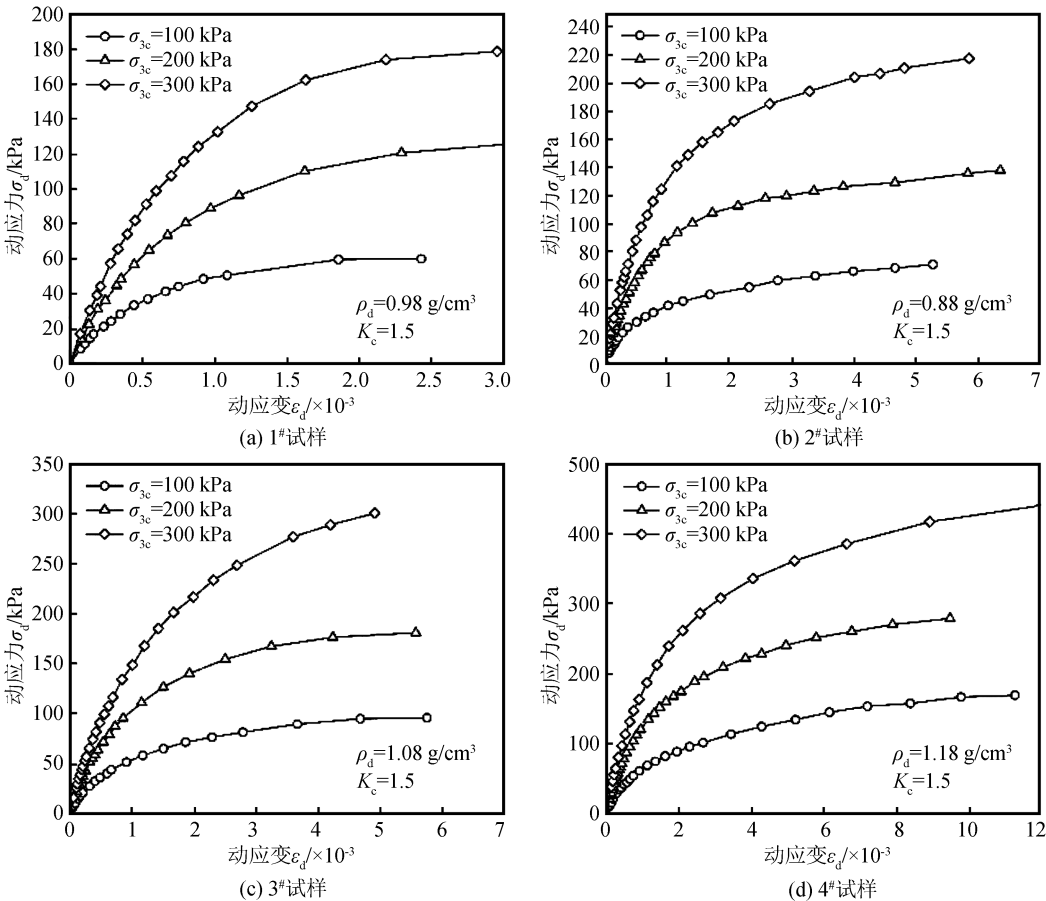


图 1 粉煤灰动应力-动应变骨干曲线

Fig.1 Dynamic stress-dynamic strain backbone curves for the fly ash specimens

粉煤灰试样的骨干曲线均表现出明显的非线性特征,呈应变硬化型,且随固结压力增大,骨干曲线上对应于同一给定动应变的动应力逐渐升高,峰值动应力也越大,表现出与一般土类相似的曲线形态。此外,冲填灰和沉积灰两类试样的峰值动应力也随干密度增大而显著提高,表明在本次试验所考虑的密度范围内,粉煤灰颗粒压缩越密实其所表现出的动应力也越高。值得注意的是,沉积灰试样由于其较小的干密度及较疏松的颗粒排列特征也导致其强度显著低于冲填灰试样。

为了进一步分析曲线形态,结合试验数据获得了不同动应变 ϵ_d 对应的动弹性模量 E_d ,并对数据进行无量纲化处理,即引入 $\bar{E}_d$ 和 $\bar{\epsilon}_d$,并分别以这两个指标为纵、横坐标绘制了动弹性模量与动应变的关系曲线(图 2)。可以看出,不同固结压力下粉煤灰试样的 $\bar{E}_d$ 和 $\bar{\epsilon}_d$ 关系曲线呈现出良好的归一特点,与固结压力的关系并不明显。据此,对 $\bar{E}_d$ 和 ϵ_d 关

系进行数据回归分析,经过对比发现采用双曲线型关系可以得到较高的回归系数,即:

$$\bar{E}_d = \frac{1}{a + b\bar{\epsilon}_d}$$

(1)

式中: $\bar{E}_d = \frac{E_d}{E_{dmax}}$, $\bar{\epsilon}_d = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_r}$; E_{dmax} 为最大动弹性模量, ϵ_r 为参考应变。

可根据数据处理,将式(1)转换为 $1/\bar{E}_d$ - $\bar{\epsilon}_d$ 之间关系,并将其绘制于图 3。可见,不同试验条件所对应的数据点大致呈线性关系,通过数据拟合可以得到待定参数 a 和 b (表 2)。可见,采用线性关系拟合 $1/\bar{E}_d$ 和 $\bar{\epsilon}_d$ 的关系是比较可靠的,其回归系数均高于 0.90。

2.2 动强度

对于偏压固结条件下的振动三轴试验,这里选取试样综合应变达到 5%作为破坏标准。按破坏标准确定破坏振次 N_f ,并作出不同固结压力下破坏动

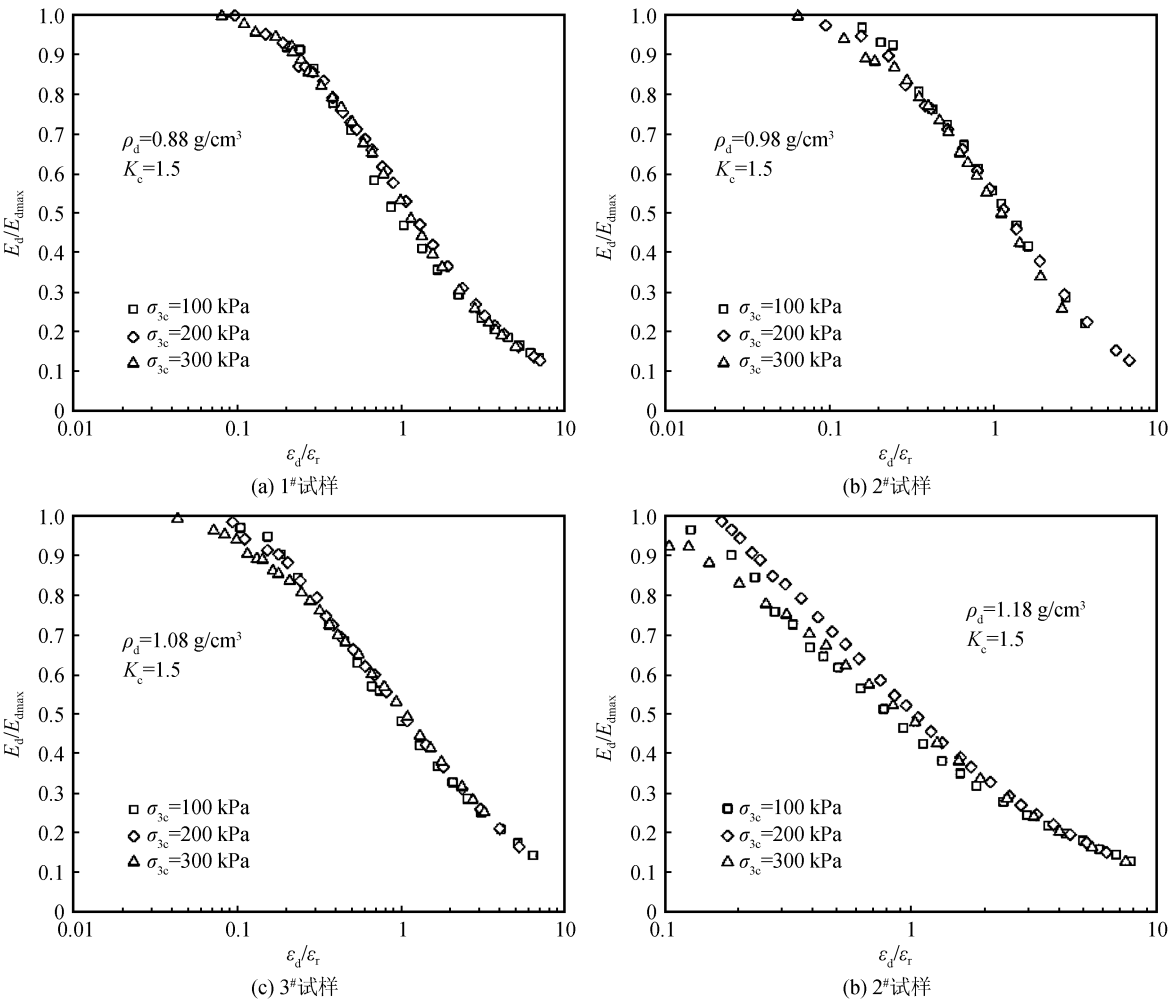


图 2 $\bar{E}_d$ 和 $\bar{\epsilon}_d$ 关系曲线

Fig.2 Relationship curves between $\bar{E}_d$ and $\bar{\epsilon}_d$

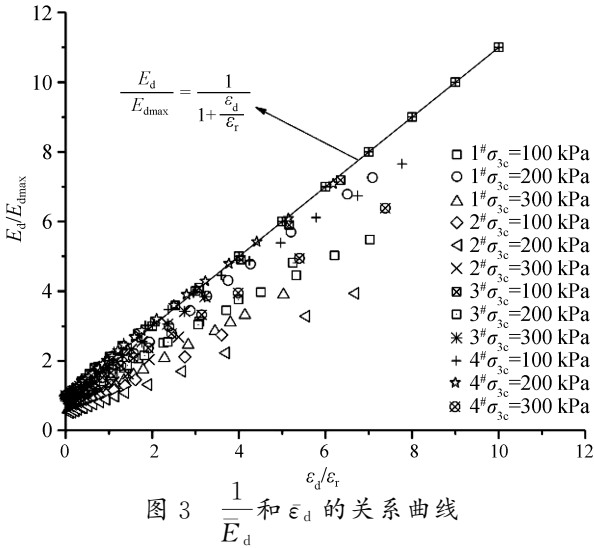


图 3 $\frac{1}{E_d}$ 和 ϵ_d 的关系曲线

Fig.3 Relationship curves between $\frac{1}{E_d}$ and ϵ_d

表 2 拟合参数

Table 2 Fitting parameters

试样类型	a	b	R ²
1 #	0.723	0.757	0.994
2 #	0.562	0.598	0.978
3 #	0.928	0.874	0.997
4 #	0.920	0.857	0.990

应力 σ_d 与破坏振次 N_f 之间的关系图(图 4)。从图中可以看出,偏压固结条件下,试样的破坏动应力随固结压力的增大而提高,说明达到相同破坏振次时,固结压力越大所需动应力越大,这与较高固结压力下粉煤灰试样较密实有关。此外,随破坏振次增加,试样所需动应力逐渐降低。再对数据进一步进行无量纲化处理,计算不同试验条件下试样的动应力比 $\sigma_d/(2\sigma_{3c})$,并将其与破坏振次 N_f 关系绘制于图 4。可以看出,不同固结压力下试样的 $\sigma_d/(2\sigma_{3c})$ -

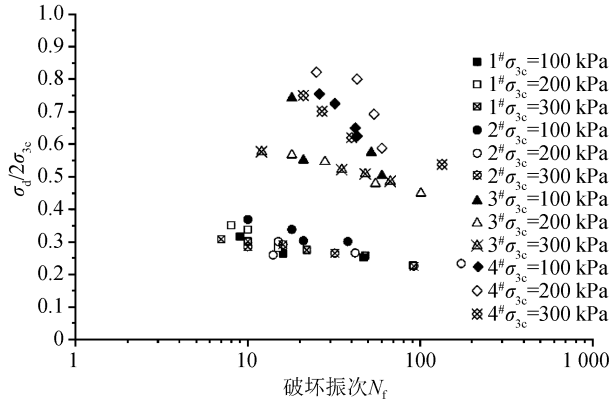


图 4 破坏动应力与破坏振次的关系

Fig.4 Relationship between dynamic failure stress and failure cyclic number

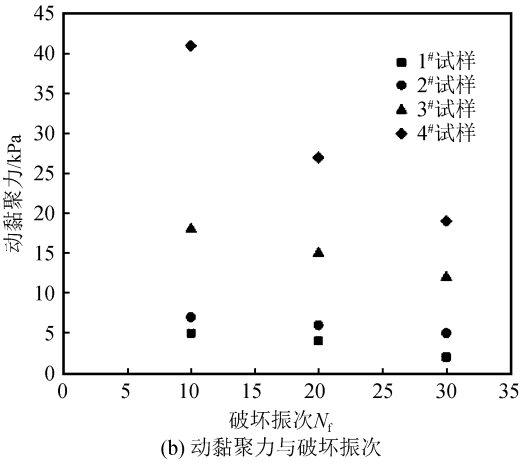
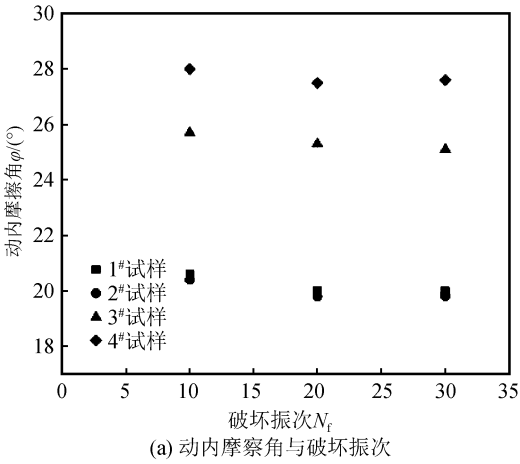


图 5 动强度参数与破坏振次的关系

Fig.5 Relationship between dynamic strength parameters and failure cyclic number

N_f 数据点分布在很窄的范围内,可以近似地归为一为一条直线,说明固结压力对该关系影响有限,这与褚峰等^[9]对饱和淤泥质砂土的振动三轴试验结果大体一致。

图 5 给出了不同试样的动黏聚力和动内摩擦角与破坏振次的关系。可以看出,循环振次增加,试样的动黏聚力均呈降低趋势,对冲填灰试样而言其下降更加显著,近似呈线性降低趋势,但对沉积灰试样

而言该趋势并不明显,这也与其较为松散的初始结构有关。此外,内摩擦角随破坏振次增加其衰减幅度相对较小,仅发现对密实度相对较高的冲填灰试样(4# 试样, $\rho_d = 1.18 \text{ g/cm}^3$)有较为明显的降低趋势,但对其余试样,尤其是对沉积灰试样而言,其动内摩擦角基本保持不变。

2.3 阻尼比

阻尼比反映土在循环荷载中的能量耗散,是土

动力特性的一个重要指标。阻尼比的选定标准为振次($N_f=2$)的 λ - ϵ_d (弹性应变)关系曲线并延伸得到 $\epsilon_d=10^{-4} \sim 10^{-2}$ 范围内不同应变幅所对应的阻尼比。对不同固结压力下的土样双对数坐标系中 $\lambda/\lambda_{\max}-(1-G_d/G_{d\max})$ 关系,近似地回归为直线,其

关系数学表达式为:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}}=\left(1-\frac{G_d}{G_{d\max}}\right)^m \tag{2}$$

不同土样的 $\lambda/\lambda_{\max}-(1-G_d/G_{d\max})$ 关系如图 6 所示。

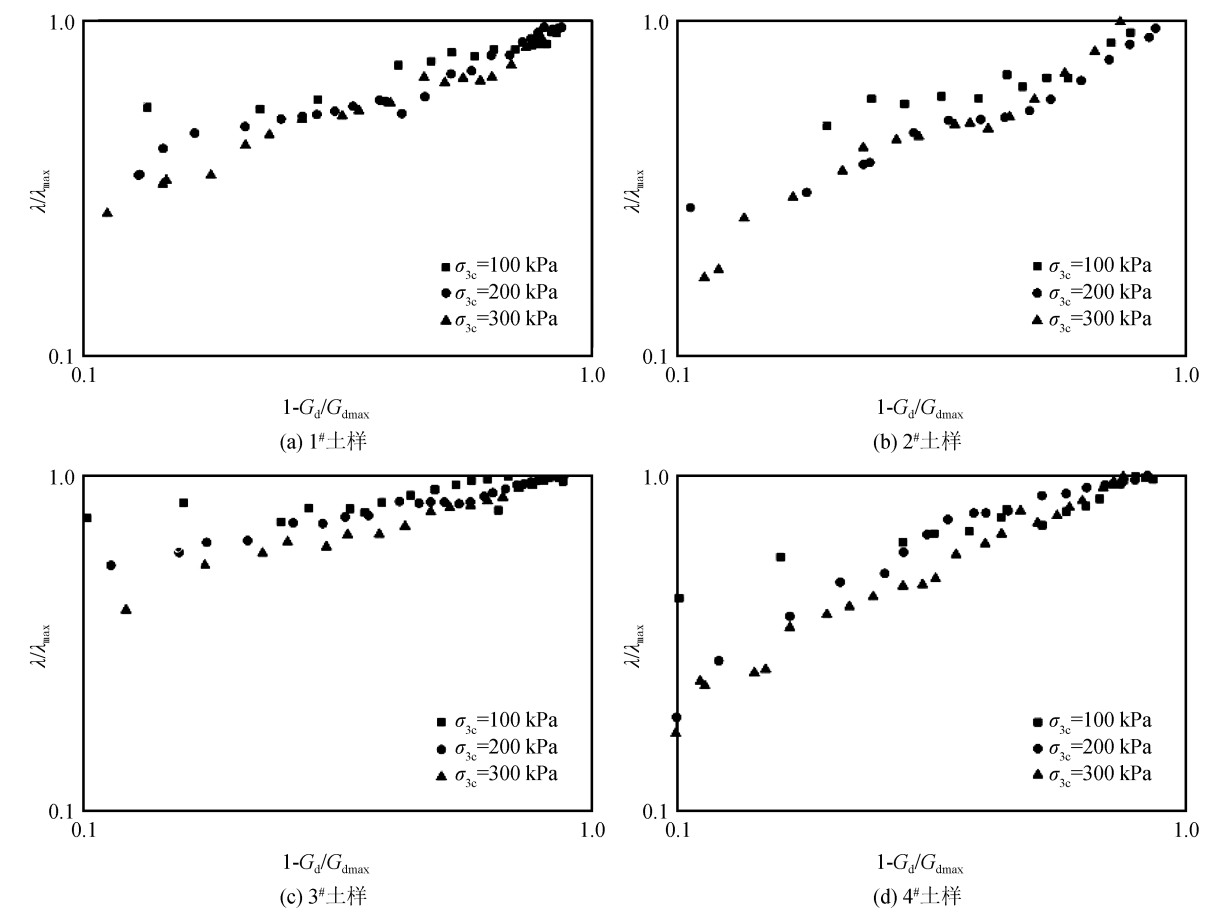


图 6 土样的 $\lambda/\lambda_{\max}-(1-G_d/G_{d\max})$ 关系曲线
Fig.6 Relationship curves between $\lambda/\lambda_{\max}$ and $1-G_d/G_{d\max}$

由图 6 可知,四个不同土样均满足式(2)的回归方程,粉煤灰的阻尼比 λ 随动应变的增大而增大,在动剪切模量较低时阻尼比增长较快,而在动剪切模量较高时阻尼比增长减慢。在低应力下动应变主要为弹性应变,随着动应力的逐渐加大,增加的动应变中塑性变形所占的比例增大。

2.4 动孔隙水压力

整理四类土样在不同围压下的数据并进行归一化处理,其归一化结果符合 Seed 模型。粉煤灰的动孔压发展试验曲线与 Seed 拟合曲线较一致,试验常数 θ 值如表 3 所列。

$$u_d/\sigma'_{3c}=\frac{1}{2}+\frac{1}{\pi}\arcsin\left[2\left(\frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{\theta}}-1\right] \tag{3}$$

式中: θ 为试验常数,取决于土类和试验条件。

由表 3 可知,参数 θ 随着围压的增加而减小,不同土样的 θ 随着干密度的增大而减小。干密度越小,粉煤灰颗粒之间的排列越疏松,相同振次比作用下,粉煤灰的振动孔压不易消散,因而发展较快,从而导致振次比相同的情况下,干密度越小的粉煤灰振动孔压呈逐渐变大的趋势。当 N/N_f 小于 0.2 时,孔隙压力增大缓慢;达到 0.2 左右时,孔压开始快速增加;超过 0.2 以后,粉煤灰试验内部产生破坏,直到 N/N_f 为 1,即孔压接近达到围压时,粉煤灰发生液化。

3 讨论与结论

本文以某场地粉煤灰贮灰场坝为研究对象,利用动三轴仪对现场粉煤灰进行不同应力状态下的试

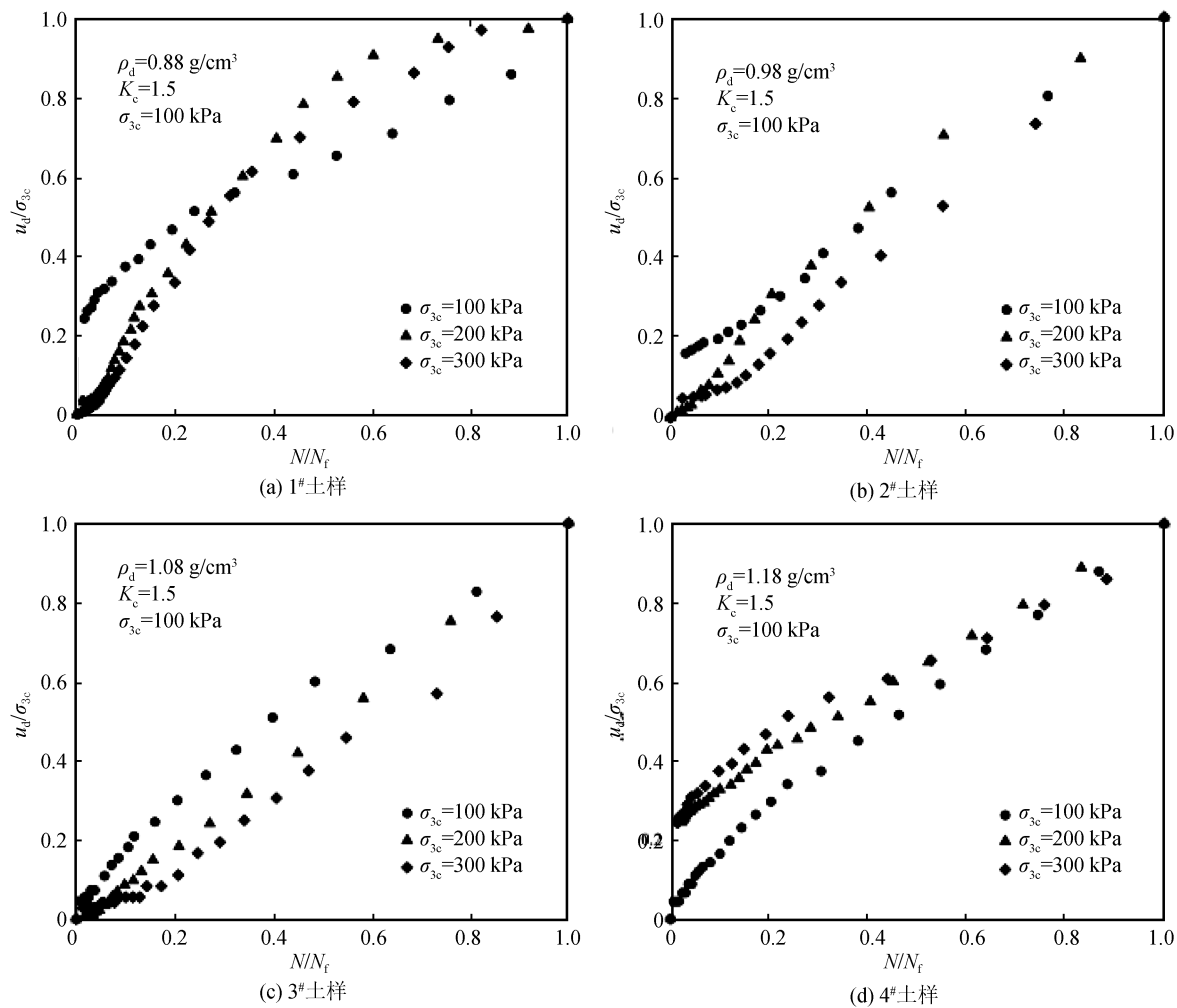


图 7 $u_d/\sigma'_{3c}-N/N_f$ 的关系曲线

Fig.7 Relationship curves between u_d/σ'_{3c} and N/N_f

表 3 不同土样的动孔压模型参数

Table 3 Model parameters for the dynamic pore pressure of different specimens

编号	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	固结应力 比 K_c	周围压力 σ_{3c}/kPa	Seed 模型中 θ 的值
1 #	0.88	1.5	100	2.2
			200	1.86
			300	2.5
2 #	0.98	1.5	100	1.2
			200	1.1
			300	0.75
3 #	1.08	1.5	100	1.22
			200	0.71
			300	0.55
4 #	1.18	1.5	100	1.12
			200	1.8
			300	1.05

验,揭示其动力变形特性及动强度特性、阻尼比与动孔压等动力特性之间的关系。得到以下结论:

(1) 粉煤灰的动力特性与砂土类似。粉煤灰试

样的骨干曲线均表现出明显的非线性特征,呈应变硬化型,且随固结压力增大,骨干曲线上对应于同一给定动应变的动应力逐渐升高,峰值动应力也越大。

(2) 试样的破坏动应力随固结压力增大而提高,相同破坏振次时,固结压力越大所需动应力越大。随破坏振次增加,试样所需动应力逐渐降低。

(3) 粉煤灰的阻尼比 λ 随着动应变的增大而增大,在动剪切模量较低时阻尼比增长较快,动剪切模量较高时阻尼比增长减慢。

(4) 不同围压下动孔压规律的归一化符合 Seed 模型,且 N/N_f 小于 0.2 时变化较小,大于 0.2 时孔压开始快速增加。

研究结果对于我国贮灰场设计和动力稳定性评价具有一定的指导意义。

参考文献(References)

[1] 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),2007,28(12):1766-1769.

LI Ming,LIANG Li,ZHAO Jun,et al.Dynamic Response and Liquefaction Analysis of Large Ash Storage Dam[J].Journal of Northeastern University (Natural Science),2007,28(12):1766-1769.

[2] 王桂萱,王中正.粉煤灰坝的动力反应分析[J].岩土工程学报,1988,10(5):87-92.

WANG Guixuan,WANG Zhongzheng. Dynamic Response Analysis of Fly Ash Dam [J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1988,10(5):87-92.

[3] 郭佩玖,胡成.粉煤灰的动力特性及动力分析[J].岩土工程学报,1988,10(5):80-83.

GUO Peixi,HU Cheng.Dynamic Characteristics and Dynamic Analysis of Fly Ash[J].Journal of Geotechnical Engineering,1988,10(5):80-83.

[4] 胡颂嘉.论灰坝的液化和动力稳定性[J].浙江大学学报(自然科学版),1988,22(5):43-50.

HU Songjia. On Liquefaction and Dynamic Stability of Ash Dam [J].Journal of Zhejiang University (Natural Science Edition),1988,22(5):43-50.

[5] ZHOU Jian,QI Peijiang,CHI Yong.3-D Dynamic Analysis of Taiyuan Fly Ash Dam.12WCEE2000:0274-0279.

[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.

DONG Lei.Study on Dynamic Characteristics of Fly Ash Mixed with Soil [D].Yangling:Northwest Agriculture and Forestry University,2009:5-12.

[7] 张昭,蒋敏敏,郭呈周.地震作用下粉煤灰液化和动模量弱化特性研究[J].混凝土,2017(6):88-92.

ZHANG Zhao,JIANG Minmin,GUO Chengzhou.Characteristics of Liquefaction and Dynamic Modulus Weakening of Coal Ash under Earthquake Action[J].Concrete,2017(6):88-92.

[8] 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(增刊1):3080-3086.

LI Zhen,LUO Yasheng,XING Yichuan.Experimental Study on Dynamic Characteristics of Fly Ash under Dynamic Torsional Shear Load[J].Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(Suppl):3080-3086.

[9] 褚峰,邵生俊,陈存礼.饱和淤泥质砂土动力变形及动强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3299-3305.

CHU Feng,SHAO Shengjun,CHEN Cunli. Experimental Study of dynamic Deformation and Dynamic Strength Properties of Saturated Silty Sand[J].Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Suppl):3299-3305.