

粉煤灰作为路堤填料的动力特性试验研究

李时亮, 周全能

(铁道第四勘察设计院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 粉煤灰用作路堤填料时, 其动力特性是大家较为关注的问题。在扬州电厂粉煤灰动三轴试验的基础上, 对影响粉煤灰动强度的若干影响因素进行了分析, 对粉煤灰路堤在饱水条件下的抗液化性能进行了探讨。研究结果表明: 振次、初始静应力水平、含水量等对粉煤灰的动强度都有显著的影响; 粉煤灰路堤在饱水条件下的抗液化性能则与地震动峰值加速度、初始静应力水平等有密切关系。

关 键 词: 粉煤灰; 路堤填料; 动强度; 液化

中图分类号: O347.2

文献标识码: A

Experimental research on dynamic properties of fly ash for embankment filling

LI Shi-liang, ZHOU Quan-neng

(The Fourth Survey and Design Institute of Railway, Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the triaxial tests of fly ash of Yangzhou Power Plant, some factors affecting the dynamic intensity of fly ash for embankment filling are analyzed. The capability resisting liquefaction of fly ash embankment under saturated condition is also discussed. The research results show that the vibration times, initial static stress level and water content etc. have obvious influence on the dynamic intensity of fly ash; the capability resisting liquefaction of fly ash embankment under saturated condition is related to earthquake peak acceleration and initial static stress level etc..

Key words: fly ash; embankment filling; dynamic intensity; liquefaction

1 引 言

粉煤灰是燃煤电厂产生的一种废渣, 具有自重轻、强度高、压缩性小、渗透性及水稳性好等良好的工程特性^[1~3], 可用作路堤填料。欧美一些国家20世纪70年代就在路基工程中大量使用粉煤灰。我国公路部门于80年代开始将粉煤灰用于填筑路堤, 90年代以来, 铁路部门也开始进行粉煤灰填筑路堤的工程试验。目前, 对粉煤灰作为填料的物理性质、静力学性质研究较多, 已取得了大量的成果, 但对粉煤灰作为填料的动强度特性、粉煤灰路堤抗震液化问题的研究则相对较少。

本文通过动三轴试验, 对扬州电厂粉煤灰动强度的振次效应、静应力水平及含水量等影响因素进行了研究, 并对粉煤灰路堤抗液化性能进行了分析。

2 粉煤灰的动强度特性

振动荷载对土的力学性质的主要影响有: ①土

的强度降低; ②地基产生附加沉降; ③砂土产生液化; ④粘性土产生触变。其根本原因在于振动使土的抗剪强度降低^[4]。而对于粉煤灰路堤, 主要关心的是粉煤灰在振动荷载作用下的动强度特性以及在饱和状态下的抗地震液化两个方面的问题。

2.1 试验研究方法及参数选取

由于土的动力本构关系比较复杂, 目前土的动强度研究一般仍采用直接试验分析方法。粉煤灰的动强度与振次、静应力状态、破坏标准等都有密切的关系。

(1) 静应力状态。受荷土体往往是在一定静应力作用下承受动荷载作用的, 一般以 σ_{1c} (轴向初始静应力) 和 σ_{3c} (侧向应力) 的比值, 即固结比 K_c 来反映静应力状态, 本次研究分别取 K_c 为1.0, 1.5, 2.0作对比试验。

(2) 破坏准则。本次试验仪器为应力控制式动三轴剪切仪, 破坏标准采用“应变破坏标准”, 将破坏应变 ε_f 定为弹性应变与塑性应变之和, $\varepsilon_f = 5\%$ 。

(3) 地震及列车动载考虑。地震应力是不规则的、低频的、有限次数(一般 10~30 次)的脉冲衰减振动。室内研究常根据积累破坏作用相等的原则,将不规则的应力波转换为等效均匀应力波。H.B.Seed 根据一系列强地震记录的计算并参照大型振动台上饱和砂土液化试验资料,在取 1~1.5 的安全系数后得出不同地震动峰值加速度作用的等效循环次数,如表 1 所示。

列车荷载是具有一定时间间隔的不规则的、低频的、有限次数的振动荷载的反复作用,考虑这一特点,一般采用大振次下的强度作为设计参考值。

表 1 不同地震动峰值加速度作用的等效循环次数
Table 1 The equivalent cycle times under different earthquake peak accelerations

地震动峰值加速度 /g	等效循环次数 N_f /次	持续时间 /s
0.05	5	8
0.1	12	20
0.2	30	60

2.2 动强度的振次效应

图 1~3 分别为含水量取 20%, 30%, 40% 的粉煤灰击实后的动强度与振次的关系曲线,振动频率为 1 Hz。表 2 给出了粉煤灰($w=30\%$, $K_h=0.86$, $K_c=2.0$)动强度在不同振次条件下的衰减系数(σ_{sf} 为静强度, σ_d 为动应力)。

试验结果表明,粉煤灰的动强度振次效应明显,即使是在低振次条件下,其动强度也有一定的衰减,这不同于一般粘性土。但当振次 N_f 大于 1 000 次后,曲线已渐趋平缓。表 2 亦表明,振次为 1 000 及 3 000 次强度差别很小,粉煤灰的动强度渐趋稳定。

2.3 固结比及初始应力水平对粉煤灰动强度的影响

图 4 给出了不同固结比条件下粉煤灰($w=40\%$)动强度与振次的关系曲线。由图可知,固结比对粉煤灰动强度有一定影响。将 3 种固结比条件相比较可见,振次相同时, $K_c=1.5$ 时动强度最高; $K_c=2.0$ 时次之; $K_c=1.0$ 时动强度最小。

图 5 给出了击实粉煤灰的 $(\sigma_d + \sigma_s) / \sigma_{sf}$ 与 σ_s / σ_{sf} 在 $N_f=10 \sim 3 000$ 次的关系曲线(σ_s 为初始静应力, $K_c=2.0$)。曲线表明,初始静应力水平对粉煤灰动强度影响明显,当振次相同时,动强度随初始静应力水平的增加而增加。

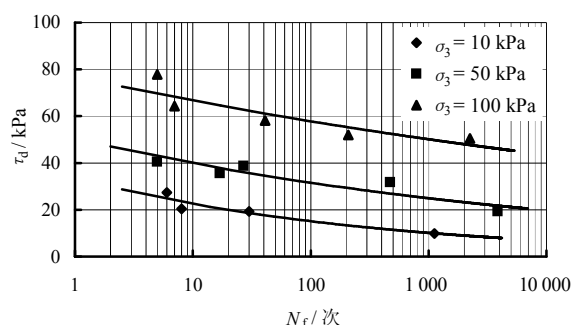


图 1 动强度与振次的关系($w=20\%$)
Fig.1 Relation between dynamic intensity and vibration times ($w=20\%$)

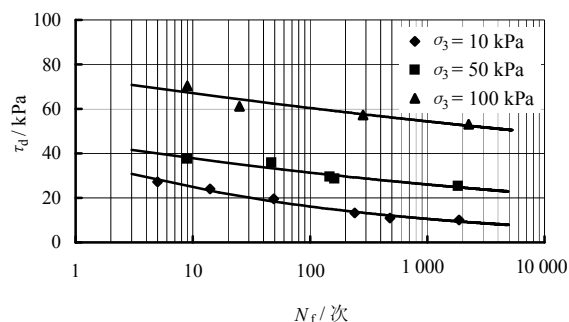


图 2 动强度与振次的关系 ($w=30\%$)
Fig.2 Relation between dynamic intensity and vibration times ($w=30\%$)

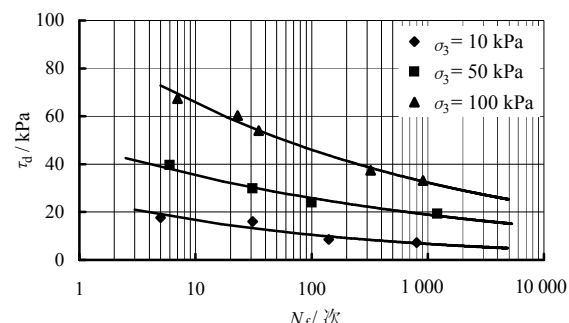
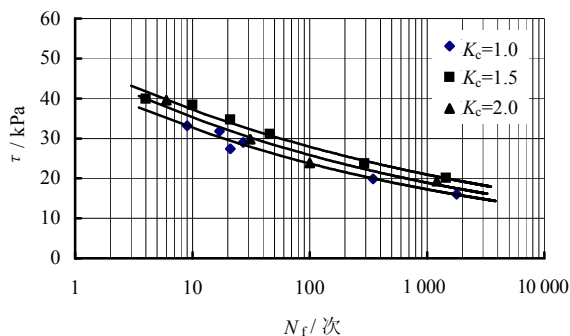
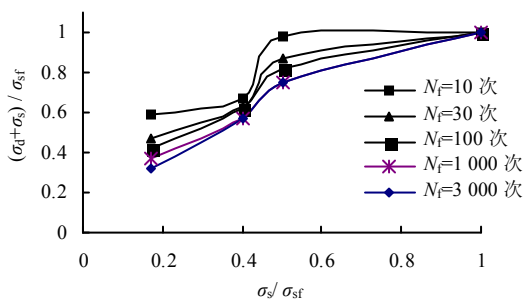


图 3 动强度与振次的关系($w=40\%$)
Fig.3 Relation between dynamic intensity and vibration times($w=40\%$)

表 2 粉煤灰动强度与静强度的比较 ($K_c=2.0$)
Table 2 Comparison between static intensity and dynamic intensity of fly ash ($K_c=2.0$)

σ_3 /kPa	σ_{sf} /kPa	$\sigma_d + \sigma_{1c}$ /kPa	$(\sigma_d + \sigma_{1c}) / \sigma_{sf}$	振次 N_f /次
10	119.2	70	0.59	12
50	201.0	193	0.96	
100	504.4	340	0.67	
10	119.2	60	0.50	30
50	201.0	178	0.89	
100	504.4	324	0.64	
10	119.2	42	0.35	1 000
50	201.0	152	0.76	
100	504.4	292	0.58	
10	119.2	39	0.33	3 000
50	201.0	146	0.73	
100	504.4	285	0.57	

图4 不同固结比时动强度与振次关系($\sigma_3 = 50$ kPa)Fig.4 Relation between dynamic intensity and vibration times under different consolidation ratios ($\sigma_3 = 50$ kPa)图5 $(\sigma_d + \sigma_s) / \sigma_{sf}$ 与 σ_s / σ_{sf} 的关系Fig.5 Relation between $(\sigma_d + \sigma_s) / \sigma_{sf}$ and σ_s / σ_{sf}

2.4 含水量对粉煤灰动强度的影响

2.4.1 粉煤灰的击实特性

粉煤灰的最佳含水量(w_{opt})范围远较一般粘性土大,在重型击实标准其一般为28%~40%。粉煤灰最大干密度较小,在重型击实标准中其一般为1.0~1.25 g/cm³。扬州电厂粉煤灰重型击实曲线见图6。

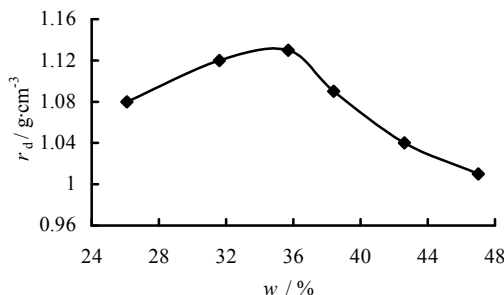


图6 粉煤灰的击实曲线

Fig.6 Compaction curves of fly ash

试验曲线表明,粉煤灰的可击实含水量范围较宽,在 $w_{opt} - 10\% \sim +6\%$ 的含水量范围内可达到较高的压实系数,实际填筑时也表现出相同规律。

2.4.2 不同含水量粉煤灰的动三轴试验

粉煤灰的静三轴试验结果表明,粉煤灰的静抗剪强度指标在含水量 $w_{opt} - 10\% \sim +8\%$ 范围内基本

稳定^[5]。为了研究含水量变化对粉煤灰动强度的影响,取扬州电厂粉煤灰($w_{opt} = 30\%$)分别按 $w = 20\%$, 30% , 40% 击实后进行了静三轴与动三轴对比试验,不同含水量粉煤灰动强度与振次的关系曲线见图1~3。不同含水量粉煤灰击实后在不同振次条件下的动强度指标及静强度指标见表3。

表3 不同含水量时粉煤灰动、静抗剪强度

Table 3 Static intensity and dynamic intensity of fly ash under different water contents

$w / \%$	动抗剪强度指标			静抗剪强度指标	
	$N_f / \text{次}$	$\varphi_d / (^\circ)$	c_d / kPa	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa
20	12	30	10	36	25
	30	29	8		
30	12	30.5	10	36	23
	30	29	9		
40	12	20	7.5	32.5	21
	30	18.6	6		

在 $N_f = 12 \sim 30$ 次之间,不同含水量粉煤灰的动强度指标与静强度指标相比都有一定衰减。当含水量在 $w_{opt} - 10\% \sim w_{opt}$ 范围时,动强度指标基本保持稳定,含水量的影响不明显,这与梁波等^[6]的试验结果有相同规律,而当含水量取 $w_{opt} + 10\%$ 后,动强度衰减幅度明显加大,含水量影响显著。

2.5 击实粉煤灰在饱和状态下的抗液化性能

地基液化是一种特殊的动强度问题,由于对土建工程危害极大,预测和防治液化成为工程技术人员十分关注的课题。从颗粒组成看,粉煤灰介于粉砂与粉土之间,因此,研究击实粉煤灰在饱和状态下的地震液化问题对粉煤灰路基工程有重要的意义。

2.5.1 研究方法

H.B.Seed等认为,土单元在地震作用下产生一系列多次改变方向的循环剪应力和剪应变可近似用循环荷载三轴压缩试验来实现。基于此,可以用实测地震剪应力与砂土抗液化剪应力对比的方法来判别砂土是否会液化。

(1) 地震剪应力的确定。平均等效剪应力 τ_{av} 取 $\tau_{max} 0.65$ 。 τ_{max} 可用式(1)计算:

$$\tau_{max} = \gamma h C_\phi a_{max} / g \quad (1)$$

于是

$$\tau_{av} = 0.65 \tau_{max} \quad (2)$$

式中 τ_{max} 为深度 h 的单位面积上的土柱体在地面运动最大加速度时的最大剪应力; γ 为土的重度; a_{max} 为最大加速度(地面运动); g 为重力加速度; C_ϕ 为折减系数,与深度有关。

(2) 粉煤灰抗液化剪应力确定。抗液化剪应

力用振动三轴仪测定,试样饱和后按固结比为 1.0 的条件固结,然后保持侧向 σ_3 不变,在竖向施加一个动应力 σ_d ,观测动孔压及动变形的过程,直至液化破坏,求出破坏时的应力循环周数 N_f 和孔压 u_d ,改变 σ_d 即可测出对应不同 σ_d 的 N_f 和 u_d ,作出 $(\sigma_d/2\sigma_0, \sigma_0$ 为初始固结应力)与 N_f 关系曲线。于是,对应任一等效循环次数时的抗液化剪应力比 $(\sigma_d/2\sigma_0)$ 即可从曲线上查出。

考虑到室内振动三轴试验与现场条件存在的差异,对室内动三轴试验值应乘以系数 C_r ,当振次 N_f 为 2~30 次时, C_r 取 0.55~0.59。

2.5.2 试验结果

图7为扬州电厂粉煤灰饱和后 $\sigma_d/2\sigma_0$ 与振次 N_f 关系曲线($K_h=0.86$)。

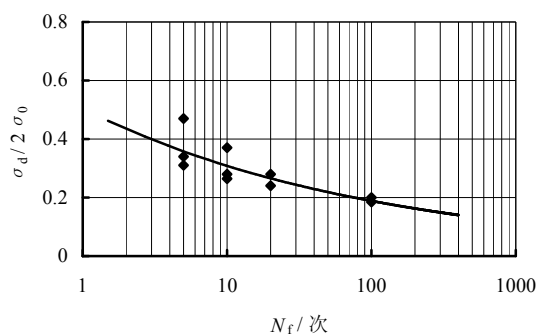


图7 $\sigma_d/2\sigma_0$ 与 N_f 关系曲线

Fig.7 Relation between $\sigma_d/2\sigma_0$ and N_f

从图可得出,对应等效循环振次 N_f 为 12, 30 次的 $\sigma_d/2\sigma_0$ 分别为 0.3 及 0.24。粉煤灰的填方湿重度取为 13.0 kN/m³。设地下水位位于地表,考虑 1.0 m 的毛细水上升高度,地震剪应力计算时,上覆应力采用总应力,粉煤灰抗液化剪应力计算时,上覆应力采用有效应力。 C_ϕ 取 1.0, C_r 取 0.57。取路基中部地表一粉煤灰质点进行分析,不同高度路基及不同地震动峰值加速度条件下的地震剪应力及粉煤灰抗液化剪应力计算结果见表 4。

计算结果表明,粉煤灰路堤抗液化性能与粉煤灰本身性质、地震动峰值加速度、初始静应力水平等都有密切关系。从扬州电厂粉煤灰的试验及计算资料来看,当水文条件与计算假设符合时,对于高度在 2~15 m 的粉煤灰路堤,地震动峰值加速度为 0.1 g 时,击实粉煤灰抗液化剪应力强度大于地震剪应力,路堤底部饱水部分不会产生液化破坏;当地震动峰值加速度为 0.2 g 时,粉煤灰抗液化剪应力强度小于地震剪应力,路堤底部饱水部分将产生液化破坏。

表4 地震剪应力及粉煤灰抗液化剪应力计算结果
Table 4 Results of shearing stress due to earthquake and shearing stress resisting liquefaction of fly ash

路基高度 / m	地震剪应力/ kPa		抗液化剪应力/ kPa	
	0.1/g	0.2/g	0.1/g	0.2/g
2	1.69	3.38	2.74	2.19
4	3.38	6.76	7.18	5.75
6	5.07	10.14	11.63	9.30
8	6.76	13.52	16.07	12.86
10	8.45	16.90	20.52	16.42
15	12.68	25.35	31.64	25.31

注: 0.1, 0.2 分别为不同地震动峰值加速度条件。

3 结论

(1) 粉煤灰的动强度振次效应明显,即使是在低振次条件下动强度也有一定的衰减。但当振次 N 大于 1 000 次后,粉煤灰的动强度趋于稳定。

(2) 初始静应力水平对粉煤灰动强度影响显著,当振次相同时,动强度随初始静应力水平的增加而增加。

(3) 当粉煤灰含水量在 $w_{opt}-10\%\sim w_{opt}$ 之间时,动强度与静强度相比衰减幅度相对较小,动强度抗剪指标基本保持稳定;而当含水量大于 w_{opt} 后,动强度与静强度相比衰减幅度明显加大,含水量影响显著。

(4) 击实粉煤灰在一定条件下可能产生动力液化,其抗液化性能与地震动峰值加速度、初始静应力水平等有密切关系。

参考文献

- [1] 岳祖润,周宏业,汪春杰,等.粉煤灰在铁路工程中的应用研究[J].铁道学报,1998,20(2):131-136.
YUE Zu-run, ZHOU Hong-ye, WANG Chun-jie, et al. Application research on fly ash used for railway engineering[J]. *Journal of the Chinese Railway Society*, 1998, 20(2): 131-136.
- [2] 冯海宁,杨有海,龚晓南.粉煤灰工程特性的试验研究[J].岩土力学,2002,23(5):579-582.
FENG Hai-ning, YANG You-hai, GONG Xiao-nan. Test research on engineering characteristic of fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 579-582.
- [3] 张忠坤,候学渊,曹正康,等.粉煤灰与EPS路堤研究综述[J].岩石力学与工程学报,2001,20(4):538-542.
ZHANG Zhong-kun, HOU Xue-yuan, CAO Zheng-kang, et al. Review on coal ash and EPS used as filler of road embankment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(4): 538-542.
- [4] 王杰贤.动力地基与基础[M].北京:科学出版社,2001.
- [5] 李时亮,郑俊杰.影响粉煤灰工程性质的若干因素分析[A].地基基础理论与实践新进展[C].北京:中国环境科学出版社,2002.105-108.
- [6] 梁波,丁立.粉煤灰作为填料的水稳性试验研究[J].岩土工程学报,2002,24(1):112-114.
LIANG Bo, DING Li. Test research on water stability of fly ash as the embankment filling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(1): 112-114.