

文章编号: 1000-7598-(2005)03-0437-04

粉煤灰坝动力特性试验研究

陈建斌¹, 周立运²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2.武汉大学 土木与建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 以某电厂粉煤灰坝的加高、加固工程为研究背景, 采用大型液压伺服式振动台作为试验手段, 分别对高程为 170, 180 m 和 230 m 灰坝的模型进行了动力特性试验研究。同时, 对采用三种不同灰渣拌合料加高的 180 m 高程灰坝模型进行了动力特性评价, 认为其对灰坝的整体动力特性没有太大的影响。试验结果表明, 灰坝的自振频率是随着激振加速度的增大和坝体的加高而降低的; 坝顶加速度放大倍率也随激振加速度的增大而降低; 两者在有干滩工况下普遍大于无干滩工况。

关 键 词: 粉煤灰坝; 模型试验; 振动台; 动力特性

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Experimental research on dynamic property of fly-ash dam

CHEN Jian-bin¹, ZHOU Li-yun²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The dynamic property tests were done on the models of fly-ash dams at the elevations of 170m, 180m and 230m of a power station by the large-scale shaking table with two conditions of submerged and non-submerged beaches. The earthquake-resistance properties of the models of 180m-ash dams heightened by three mixtures of fly ash are analyzed and the conclusion is drawn that three mixtures have little influence on the dynamic property of dam. The tests also show that the natural frequency of dam and the acceleration amplification factor at the top of dam decrease with the increases of excitation acceleration and the height of dam; and both are lower under the condition of submerged beach.

Key words: fly-ash dam; model test; shaking table; dynamic property

1 引言

粉煤灰坝(简称灰坝)是贮存电厂粉煤灰的一种特殊坝体。由于粉煤灰具有颗粒细、比重小、孔隙比大、对振动荷载反应很灵敏和抗液化性能差等特点,因而对于粉煤灰坝长期处于灰水浸泡的情况,在振动荷载如地震作用下就很容易发生破坏失稳,其后果不堪设想^[1]。因而正确评价它在振动荷载作用下的动力特性,对采取合理的措施以增强其实际抵抗荷载的能力,并用于指导设计和施工是很有意义的。

对于坝体材料的动力特性研究,多以室内动力试验为主。室内动力试验主要分为动三轴试验、振动剪切试验、共振柱试验、振动台模型试验^[1~3]和离心模型试验。前三种室内动力试验不能从整体上反

映实际土工建(构)筑物的动力特性。而后两种室内动力试验属于模型试验的范畴,可以反映土工建(构)筑物整体的动力特性和在动力荷载下的宏观现象。但鉴于目前离心机的研制发展水平,它尚不能进行大比尺的模型试验,而且模拟复杂的随机振动较为困难^[1]。与之相比,振动台却能进行大比尺的模型试验,可模拟三维的随机地震振动,虽然利用振动台模型试验去研究灰坝的动力特性存在着模型材料相似律的问题,但不妨碍利用其试验成果对灰坝进行定性的动力性态研究。

2 工程概况及试验目的

某电厂灰库利用山谷的特殊地形贮存粉煤灰。初期坝的坝体材料为粘土,坝顶高程 160 m,最大坝高 40 m,坝顶宽 5 m,上游坝坡为 1:2 和 1:2.5,

收稿日期: 2004-03-02

修改稿收到日期: 2004-09-26

作者简介: 陈建斌,男,1974年生,博士生,主要从事工程振动和特殊土方面的研究。E-mail: clj263@tom.com

下游坝坡为 1:2.5、1:3 和 1:3.5。在库内已有粉煤灰基础上，经过二级粘土子坝加筑（坡度为 1:3 和 1:3.5），将初期坝顶堆至 170 m 高程。为满足电厂未来贮灰的要求，拟采用每 10 m 高程加二级灰渣拌合料子坝的方案，将坝顶高程堆至 230 m^[4]。拌合料中参加了不同配比的加固材料以增强其强度。

根据《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-1997)，该电厂灰坝应满足一级工程及抗御Ⅶ度地震的要求，为此，必须对灰坝的动力特性有充分的认识。故笔者对该电厂灰坝在坝顶高程为 170，180 m 和 230 m 三种情况和有干滩与无干滩二种工况下进行整体模型振动试验研究，通过模型试验了解该坝的动力特性，并评价了三种不同的灰渣拌合料堆筑的 180 m 高程灰坝的动力特性，这为灰坝加高和抗震设计提供必要的科学依据。

3 试验概况

3.1 试验设备

本次试验选用的激振设备是大型液压伺服式振动台。该振动台台面尺寸为 2 m×2 m，推力可达 50 kN，承重达 30 kN，激振频率为 0~100 Hz，最大输出加速度 5 g（g 为重力加速度，9.81 m/s²），最大输出位移为 ±100 mm；传感器选用 YD-8 型压电式加速度计；采用自动采集设备同步记录试验数据。

3.2 动力学相似律^[5]

采用一般弹性体动力学问题的模型相似律进行分析。在本次试验中，保持材料不变，模型比尺之间的关系为： $C_t = C_L^{1/2}$ 、 $C_f = 1/C_L^{1/2}$ 和 $C_a = 1$ 。其中： C_L 为几何比尺； C_t 为时间比尺； C_f 为频率比尺； C_a 为加速度比尺。推广到原型灰坝时，须将时间放大 $C_L^{1/2}$ 倍，加荷频率缩小 $C_L^{1/2}$ 倍，而加速度不变。

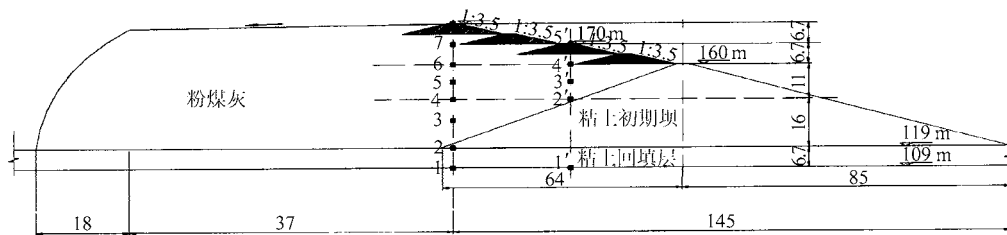
3.3 模型比尺及模型制作

考虑到振动台台面尺寸及原型灰坝主坝段的实际情况等因素，拟将 170 m 和 180 m 高程灰坝模型比尺设为 1:150，230 m 高程灰坝模型比尺设为 1:270，模型的断面及几何尺寸见图 1，2。坝体几何尺寸严格满足几何相似条件，筑坝材料基本物理参数见表 1。

表 1 筑坝材料物理参数

Table 1 Physical parameters of materials for dam

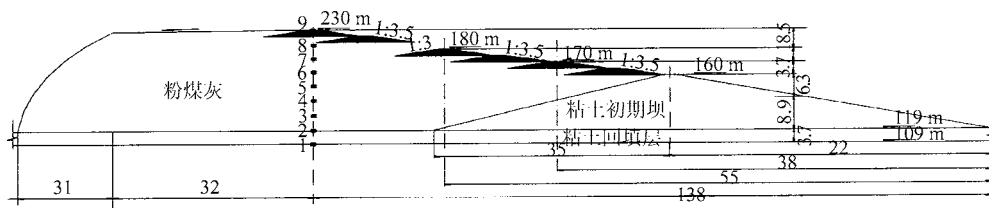
筑坝材料	含水量 / %	湿重度 / g·cm ⁻³	干重度 / g·cm ⁻³	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	孔隙比
粘土	17.8~34.9	1.79~2.02	1.33~1.76	27~14.9	2.6~29.9	0.56~1.09
粉煤灰	13~32.7	1.33~1.91	1.02~1.58	0	17.6~27.9	0.58~0.99
拌合料 1	23.7	1.45	1.17	12	29.9	0.84
拌合料 2	29.2	1.54	1.19	52	21.6	0.79
拌合料 3	25.7	1.54	1.22	25	29.4	0.77



注：■为测点

图 1 170~180 m 灰坝模型断面图(单位: cm)

Fig. 1 Cross-section of fly-ash dam at elevations of 170 m and 180 m (unit: cm)



注：■为测点

图 2 230 m 灰坝模型断面图(单位: cm)

Fig. 2 Cross-section of fly-ash dam at elevation of 230 m (unit: cm)

模型材料采用原型坝体材料，在一钢制试验槽内堆筑模型，该试槽尺寸为 2.00 m × 1.14 m × 0.70 m。对于每个模型坝，均有两种工况：有干滩和无干滩。有干滩工况即库内灰水未淹没放灰滩，此时坝体的浸润线较低，通常加水浸泡 4~5 h 就可达到设计水头线。而无干滩即灰水完全淹没放灰滩，此时坝体的浸润线非常高，干滩部分的粉煤灰为饱和状态，通常加水浸泡达 12 h。

4 动力特性试验概况

动力特性试验包括模型坝的自振频率、振型及阻尼比，并分别考虑灰坝有干滩和无干滩两种工况。模型坝动力特性试验的加速度计测点布置见图 1 和图 2，实物见图 3。



图 3 灰坝模型实物图
Fig. 3 Model of fly-ash dam for testing

本试验采用共振法测定坝体的自振频率。即由振动台控制装置向振动台输入微幅正弦波，恒定波幅 ($a_T=0.01\text{ g}$)，改变频率进行扫频试验，扫频范围拟为 5~99 Hz。以确定出模型坝的自振频率、阻尼比。

表 2 灰坝自振频率和阻尼比

Table 2 Natural frequency and damping ratio of fly-ash dam

灰坝模态物理量	模态阶数	170 m 高程灰坝				180 m 高程灰坝				230 m 高程灰坝	
		A	B	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A	B
模型频率/ Hz	第一阶	42.6	33.9	41.1	38.6	41.2	39.6	39.7	39.2	52.3	47.5
原型频率/ Hz		3.5	2.8	3.4	3.2	3.4	3.1	3.24	3.2	3.2	2.9
阻尼比/ %		6.67	7.14	6.67	/	5.39	11.36	3.1	15.3	17.0	20.4
模型频率/ Hz	第二阶	68.8	65.7	/	68.21	/	66.59	51.22	56.93	/	/
原型频率/ Hz		5.62	5.36	/	5.57	/	5.44	4.18	4.65	/	/
阻尼比/ %		/	7.91	/	/	5.39	11.36	/	17.8	/	/

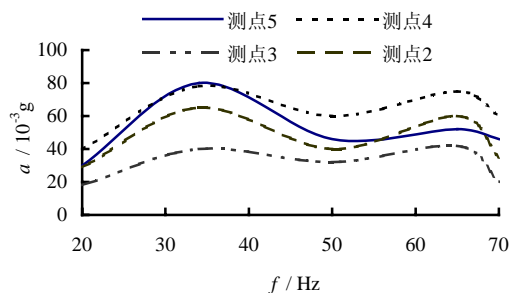
注：表中原型灰坝自振频率是根据模型相似律换算而来。A 为有干滩工况；B 为无干滩工况；1~3 代表三种拌合料，以下同。

4.2 坝体自振频率和激振加速度的关系

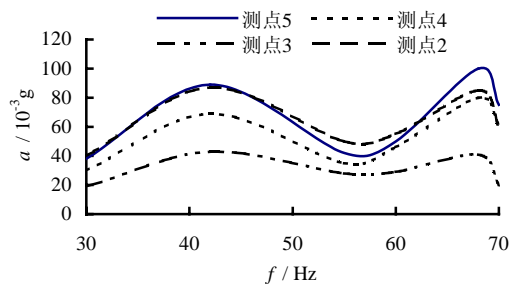
振动台的激振加速度 a_T 从 (0.01~0.05)g 范围内逐级增加，振动频率从 5~99 Hz 进行扫频试验，测

4.1 灰坝自振频率和阻尼比

用共振法测得模型坝在恒定加速度、不同频率正弦波激振下各测点的加速度响应，通过计算程序的分析，可作出有干滩和无干滩时模型坝各主要测点加速度响应和激振频率的关系曲线，即幅度-频率特性曲线，部分曲线见图 4。从幅频曲线分析可得出模型坝的第一、二阶自振频率及相应的阻尼比，见表 2。



(a) 有干滩工况



(b) 无干滩工况

图 4 170 m 高程灰坝模型无干滩时幅-频曲线
Fig. 4 Amplitude-frequency curve of fly-ash dam at elevation of 170 m

得各激振加速度时的模型坝的第一、二阶自振频率，试验结果示于图 5。从图中可见，随着激振加速度的增加，灰坝的自振频率是减小的。

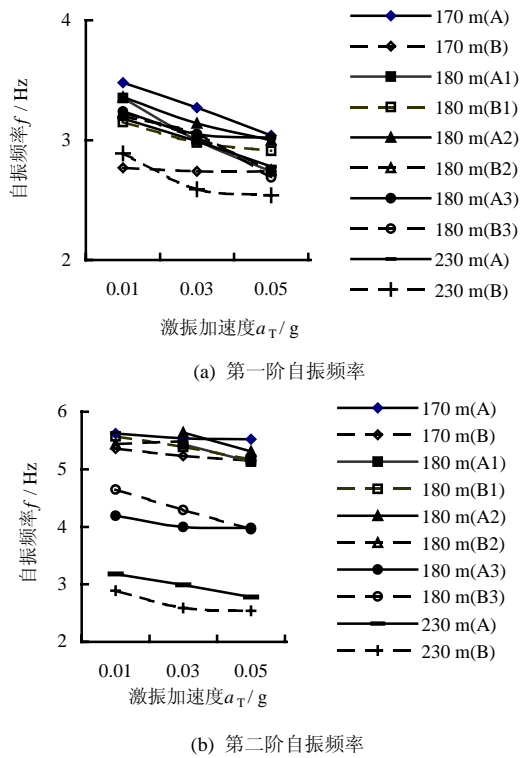


图 5 灰坝各高程激振加速度和第一、二阶自振频率的关系
 Fig. 5 Relationships between the excitation acceleration and 1st, 2nd natural frequency of the dams at different elevations

4.3 加速度放大倍率 β 与激振加速度的关系

模型坝以第一自振频率共振时，坝顶加速度响应值 a_{max} 与激振加速度 a_T (振动台面振动加速度) 的比值即为坝顶加速度放大倍率，即 $\beta = a_{max}/a_T$ 。图 6 为坝顶加速度放大倍率 β 与激振加速度关系曲线。可见，放大倍率随着激振加速度加大反而减小。

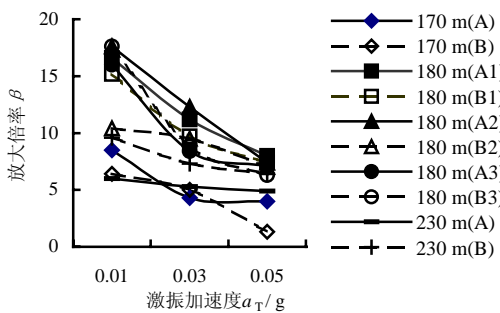


图 6 灰坝各高程坝顶加速度放大倍率与激振加速度关系
 Fig. 6 Relationships between acceleration amplification ratio β and excitation acceleration

5 结论

(1) 灰坝的自振频率随着微幅激振加速度的增大而逐渐降低 (图 5)。它随着所受振动荷载的大小而变化。同时，灰坝坝顶振动加速度的放大倍率随

着基底激振加速度的加大而逐渐减小^[3] (图 6)。这些都充分证实，灰坝的自振特性呈现明显的非线性。

(2) 灰坝的自振频率在无干滩时明显低于有干滩时 (图 5、图 6)；坝体振动加速度放大倍率 β 也是无干滩时低于在有干滩时，这是因为在无干滩工况下，库内大部分粉煤灰处于饱和状态，使坝体刚度降低，自振频率减小，相对于有干滩时坝体更容易发生局部液化而使坝体失稳，而且阻尼比的增大减弱了振动的放大作用。因而防止粉煤灰在振动荷载下发生液化，主要的措施是排水降压。

(3) 原型灰坝在 170 m 高程时的第一阶自振频率为 2.8~3.5 Hz，在 180 m 高程时是 3.1~3.4 Hz，在 230 m 高程时是 2.9~3.2 Hz；第二阶自振频率分别为 3.96~5.64 Hz (170 m) 和 5.15~5.62 Hz (180 m) (表 2、图 6)。显然，随着高度的增加，自振频率是逐渐降低的。由此可见，灰坝的主频率范围是 2.8~3.5 Hz，无论是有干滩还是无干滩，灰坝的自振频率都在地震波的主频率范围之内，这不利于坝体的抗震稳定性。且由三种灰渣拌合料分别堆筑的三个 180 m 高程模型坝自振频率和加速度放大倍率均很接近，自振频率 (当 $a_T = 0.01 g$ 时) 相差不过 2 Hz，加速度放大倍率相差不大，其动力特性基本相同，很难辨别出它们抗振性能的优劣，故拌合料筑坝对坝体的动力特性影响不大。

参考文献

[1] 周健, 白冰, 徐建平. 土动力学理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[2] 陈文化, 门福录, 景立平等. 有建筑物存在地饱和砂土地基液化振动台模型实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(4): 54-60.

CHEN Wen-hua, MEN Fu-lu, JING Li-ping, et al. Shaking table test study of liquefaction of building subsoils[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1998, (4): 54-60.

[3] 汪闻韶, 金崇磐, 王克成. 土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测[J]. 水利学报, 1987, (12): 1-14.

WANG Wen-shao, JIN Chong-pan, WANG Ke-cheng. Earthquake resistance computation and model test of earth-rock dam and its prototype observation[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1987, (12): 1-4.

[4] 陈建斌. 粉煤灰坝抗震试验研究及其动力计算[硕士学位论文D]. 武汉大学, 2003.

[5] Yoshiki Y, Kohji T. Settlement of buildings on saturated during earthquake[J]. **Soil and Foundations**, 1977, 17(1): 56-68.