

# 粉煤灰的动剪切模量

曾国熙 顾尧章 吴建平

(浙江大学, 杭州)

## 提 要

笔者在自振柱仪上研究了国内三个电厂的粉煤灰动剪切模量特性。研究发现: 动剪切模量随周围有效应力的增加而增加, 随孔隙比的增加而减少。颗粒的尺寸、级配和表面形状也将影响剪切模量值。饱和度的变化将导致动剪切模量的改变。通过比较还发现: 在相同相对密度的条件下, 粉煤灰的动剪切模量约为砂土动剪切模量的30~60%。

根据比较的结果我们认为, 粉煤灰很有可能成为较好的地基隔震材料。

## 一、前 言

我国的电力工业在近几年里得到很大发展, 为各行各业的生产建设和建设提供了强大的动力资源。但是随之也带来一个问题, 这些电厂每年要排出数以万吨计的粉煤灰, 如处理不当, 将对周围环境造成严重污染。

目前我国许多电厂的大部分粉煤灰被堆积在贮灰场里, 这当然是一种减少环境污染的方法。但是根据西方某些国家的经验和我国一些地区的研究结果, 粉煤灰及粉煤灰与其它材料的混合物可以作为较好的地基材料。<sup>[1-3]</sup>,<sup>①</sup>较早把粉煤灰用作工程材料的是英国和法国。在六十年代后期, 这两个国家的粉煤灰工程利用率已达总产量的42~55%。在欧洲和美国, 粉煤灰主要被用作构筑物的填料、高速公路路堤、道路路基、轻质回填材料等。<sup>[1]</sup>如能把大量的粉煤灰用作地基材料或构筑物回填料, 不仅可以减少环境污染, 少占堆积地面; 还可以节省大量的工程材料和人力、财力。

要能安全、可靠地使用一种工程材料, 必须了解它的物理、化学性质和工程力学性质。而对某种材料性质的每一点新发现又往往会导致它新的和更广泛的工程应用。

与砂、土相比, 粉煤灰作为地基材料的历史毕竟还不长, 因而人们对它的认识和应用都还不多。有人曾作过总结: “利用粉煤灰作构筑物的回填材料, 格雷、林(Gray、Lin, 1972)和迪吉艾等(Digiaia etc, 1972)在使用和施工方面已经作了广泛的研究, 关于粉煤灰的静力强度和特性指数, 许多文章提供了有用的资料; 但是, 有关粉煤灰动力特性方面的文章非常少”。<sup>[4]</sup>根据笔者搜集到的资料来看, 国内外目前对粉煤灰的研究主要进行了以下几方面的工作<sup>[1-5]</sup>,<sup>①②③</sup>:

①陆震亚, 李永安, 电厂废渣粉煤灰在建筑地基中的应用——粉煤灰桩复合地基, 第四届土力学会议论文, 武汉, 1983。

②郭佩玖、徐宏达, 粉煤灰应力-应变与强度初探, 第四届土力学会议论文, 武汉, 1983。

③汪闻韶、何昌荣, 一种粉煤灰的液化试验, 第四届土力学会议论文, 武汉, 1983。

物理、化学性质的研究：颗粒大小分析，比重，比表面积，塑性指数，颗粒表面形状分析。

工程、力学性质的研究：强度随时间而增长的特性，透水性试验，击实试验，应力-应变关系和强度特性，压缩变形试验，抗冻性试验，在静态和动态条件下的液化特性。

为了能比较全面地认识粉煤灰的动力特性，使粉煤灰在工程上能有更多、更广泛的应用，笔者利用自振柱仪，对粉煤灰的动剪切模量作了以下几方面的研究。

1. 干粉煤灰的动剪切模量有哪些主要影响因素？相互关系如何？
2. 饱和度对动剪切模量的影响如何？
3. 粉煤灰动剪切模量与砂土动剪切模量差异如何？

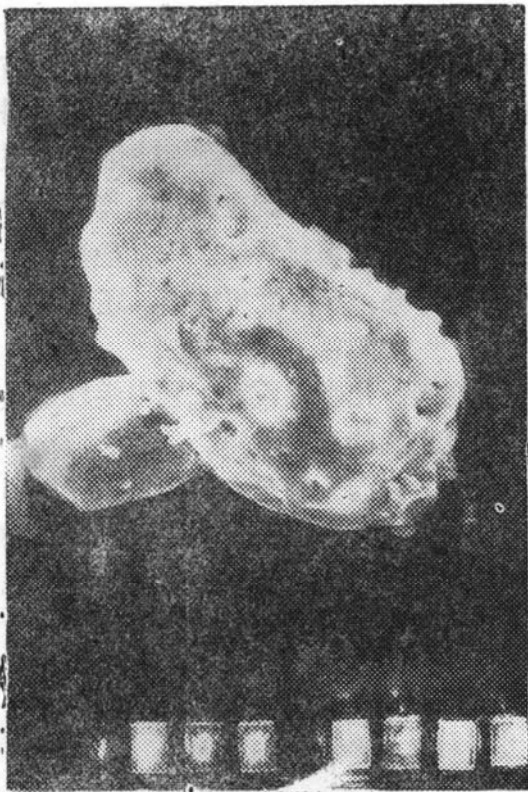
## 二、试验材料

本试验采用了江苏徐州电厂、江苏谏壁电厂和上海闵行电厂的三种粉煤灰。

徐州电厂粉煤灰(简称徐州灰)是炉膛灰渣经粉碎机粉碎而成，是三种灰中平均粒径最大的，级配均匀；颗粒大多数成近角砾状，表面多微气孔，(见图1(a))，且含较多的焦结炉渣，(见图1(d))。

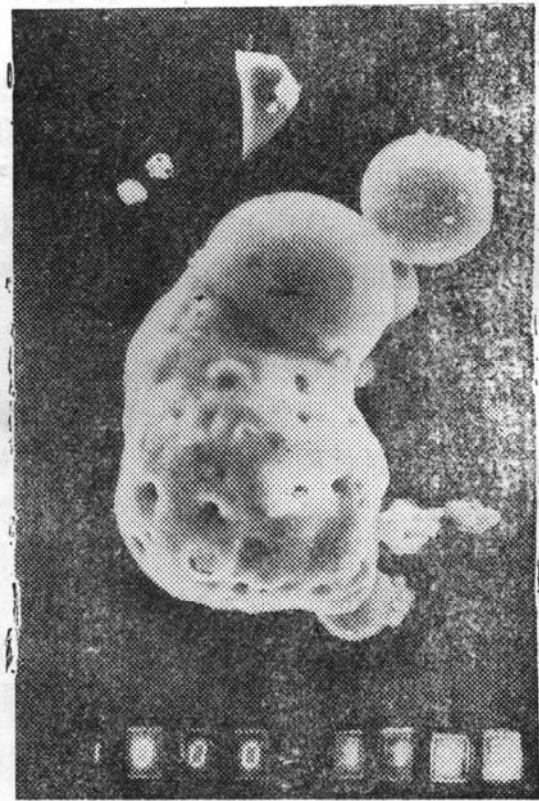
谏壁电厂粉煤灰(简称谏壁灰)是粉碎后的炉膛灰和烟囱灰的混合料。试验前筛去了大于1.0mm的颗粒，颗粒平均尺寸居中，但有效粒径最小、级配均匀；颗粒呈长圆形带圆角，表面带微气孔，(见图1(b))，含有一部分焦结炉渣。

闵行电厂粉煤灰(简称闵行灰)是烟囱沉积灰，颗粒平均尺寸最小，但有效粒径却比谏壁



(放大倍数：2000)

图1(a) 徐州灰电子显微镜放大照片

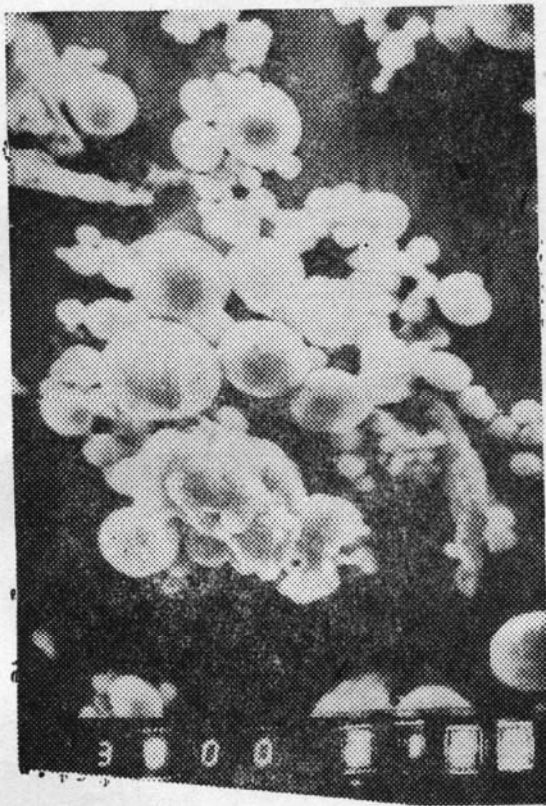


(放大倍数：2000)

图1(b) 谏壁灰电子显微镜放大照片

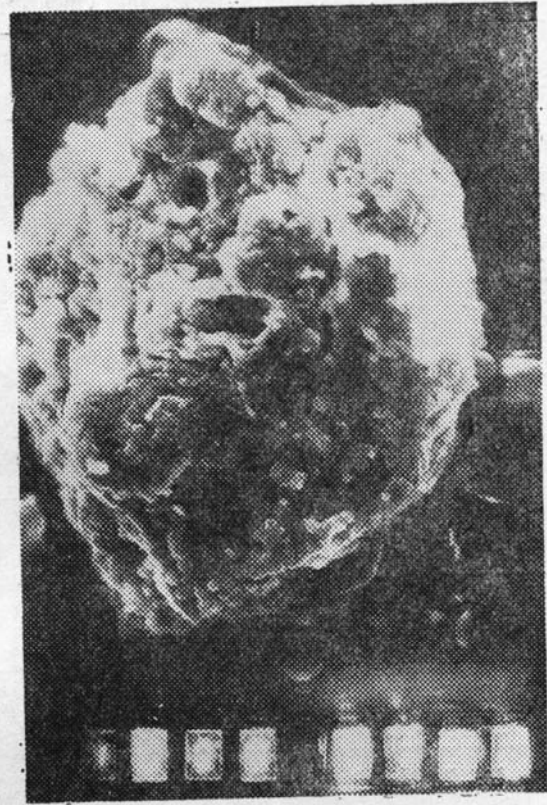
灰大，所以级配较差；颗粒均成很好的圆球状，由于颗粒更小，表面看不出是否存在微气孔（见图1(c)）。

三种粉煤灰的颗粒大小分布曲线如图2所示。



(放大倍数：6000)

图1 c 闵行灰电子显微镜放大照片



(放大倍数：2000)

图1 d 徐州灰电子显微镜放大照片

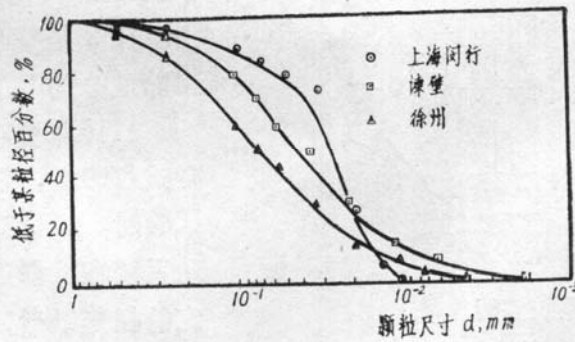


图2 三种粉煤灰的颗粒分布曲线

表1列出了三种粉煤灰的颗粒组成和级配。表2是三种粉煤灰的基本物理性质。从表2中看出：与砂、土相比较，粉煤灰的比重较小，孔隙比较大。一般粉煤灰的物理性质与煤的产地、粉化程度、出灰部位和排泄设备有关。

### 三、仪器和试验

1982年，顾尧章等人<sup>[7]</sup>在美国加州大学戴维斯分校试制成功了一种新型的土工仪器——

表1 三种粉煤灰的颗粒组成

灰名	2~0.5 (mm)	0.5~0.25 (mm)	0.25~0.075 (mm)	0.075~0.015 (mm)	<0.015 (mm)	限制粒径 $d_{60}$ (mm)	有效粒径 $d_{10}$ (mm)	均匀系数 $d_{60}/d_{10}$
徐州灰	4.0	14.0	41.5	36.0	4.5	0.096	0.015	6.4
谏壁灰	2.0	2.5	39.5	45.0	11.0	0.056	0.009	6.22
闵行灰	1.0	2.0	19.0	78.0	0	0.031	0.014	2.16

表2 试验材料的基本特性

灰名	比重	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数 $I_P$	最大孔隙比	最小孔隙比
徐州灰	2.029	64.60	60.66	3.94	1.638	0.876
谏壁灰	2.021	49.83	46.06	3.79	1.425	0.729
闵行灰	2.152	38.28	33.94	4.34	2.486	0.726

注：做塑限试验时，不易搓条，采用钢尺代手搓条

自振柱仪。该仪器采用微电子计算机控制试验、处理数据，同时采用测自由振动频率的方法代替共振柱测共振频率的方法，因而它比共振柱更节省时间，更少受先期预振动的影响，功能更强。

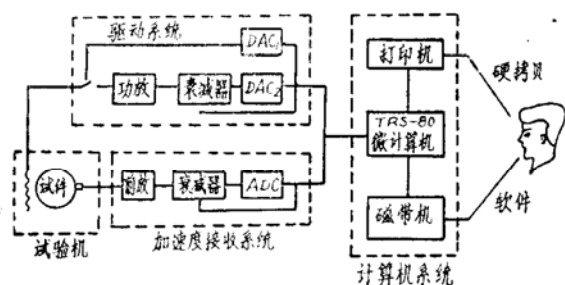


图3 自振柱系统简图

作自由振动。接着对由加速度接收系统采集到的信号进行贮存、处理，最后在行式打印机上输出一系列与剪应变相对应的动剪切模量和阻尼比。

2. 驱动系统：主要功能是根据指令在试样顶端施加扭矩。

3. 加速度接收系统：主要功能是采集试样顶端的加速度运动信号。

4. 试验主机：外形同斯托克 (Stokoe) 型的共振柱试验主机一样。它可以按需要在试样上施加不同的周围压力。试样的底端连接在主机底座上，属固定端。顶端是自由的，上面附有一个驱动盘，呈十字型，用以在试样上施加扭矩。

在试样成型以前，粉煤灰先按预定的含水量充分拌和，然后密封在塑料袋里，放入干燥器内静置12小时以上，以使粉煤灰均匀湿润。

图3是整个系统的示意图，它可以粗略地分为以下四个部分：

1. 计算机系统：包括磁带记录器和行式打印机，是整个系统的大脑中枢。试验时，微计算机根据程序指令控制驱动系统在试样顶端施加扭矩。在达到预定的扭矩以后，突然切断电源，让试样

为了减少扰动，试样成型直接在底座上进行。成型完毕以后，要用真空泵抽气到 $50\text{kN/m}^2$ 左右的负压，以免在脱模和装置仪器过程中发生扰动。一般在加上 $20\text{kN/m}^2$ 的周围压力后方可撤去真空泵。仪器按装好以后，加上预定的周围压力30分钟以后方才进行测试，以便超静孔隙水压力消散。

### 四、试验成果和分析

#### (一) 粉煤灰的小应变动剪切模量特性

本文以剪应变 $\gamma = 1 \times 10^{-5}$ 时的剪切模量为小应变动剪切模量<sup>[8]</sup>。图4是谏壁粉煤灰在风干状态下的小应变动剪切模量 $G_{od}$ 随孔隙比 $e$ 和周围有效应力 $\bar{\sigma}_o$ 变化的试验结果。徐州灰、闵行灰呈现出与谏壁灰一致的变化规律。图中表明：在相同 $e$ 的条件下， $G_{od}$ 随 $\bar{\sigma}_o$ 的增加而增加；在相同 $\bar{\sigma}_o$ 的条件下， $G_{od}$ 随 $e$ 的增加而下降。

将试验结果按 $\bar{\sigma}_o$ 归一<sup>[9]</sup>，然后进行最小二乘法拟合，(见图5)，可得出如下形式的经验公式：

$$\frac{G_{od}}{\bar{\sigma}_o^n} = A \cdot F(e) \tag{1}$$

$$F(e) = \frac{(3.3 - e)^2}{1 + e} \tag{2}$$

式中  $n$  可取0.53；

$A$ 随粉煤灰颗粒的表面形状、级配和颗粒尺寸而变，由试验测定。从表3看出，徐州、谏壁和闵行三种灰，由于颗粒尺寸、级配和表面形状的不同， $A$ 值也差别很大。定性地可以认为： $d_{10}$ 和 $d_{80}/d_{10}$ 越大， $A$ 值越大；颗粒越呈角粒状， $A$ 值越大。

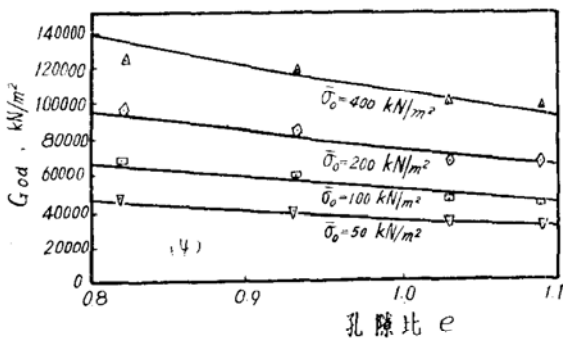


图4 谏壁灰 $G_{od}$ 与 $e, \bar{\sigma}_o$ 的关系

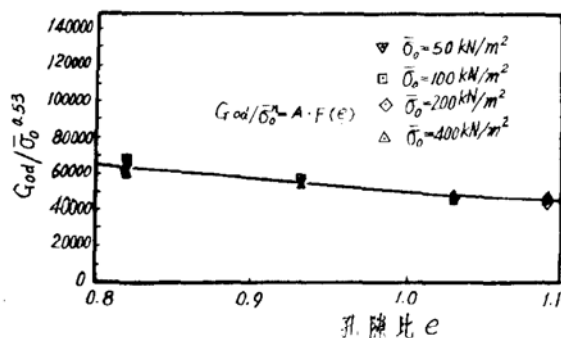


图5 谏壁灰按 $\bar{\sigma}_o$ 归一化的 $G_{od}$ - $e$ 关系

#### (二) 饱和度对动剪切模量的影响

吴世明研究了饱和度对细颗粒砂动剪切模量的影响<sup>[10]</sup>，典型的试验结果如图6所示。

为了比较，作者研究了饱和度对粉煤灰动剪切模量的影响，图7是其典型的试验结果。从图中可看出：(1)在相同饱和度条件下，粉煤灰小应变动剪切模量 $G_o$ 随 $\bar{\sigma}_o$ 的增加而增加。(2)在饱和度 $S_r$ 等于35%的地方， $G_o$ 达到峰值。与此峰值相对应的 $S_r$ 称为动力最佳饱

表3 参数 A 及其影响因素

灰名	A	n	d <sub>10</sub> (mm)	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	颗粒形状
徐州灰	2290	0.53	0.015	6.40	多成角粒状
谏壁灰	1610	0.536	0.009	6.22	部份角粒状
闵行灰	1942	0.516	0.014	2.16	圆粒状

和度, 记为  $S_o$ 。试验表明:  $S_o$  不随  $\bar{\sigma}_o$  而变化。(3) 当  $S_r \leq S_o$  时,  $G_o$  随  $S_r$  的增加而增加。当  $S_r > S_o$  时,  $G_o$  随  $S_r$  的增加而下降。当  $S_r$  继续增加, 超过一临界饱和度(记  $S_t$ ) 时,  $G_o$  降到  $G_{od}$  以下, 这从图 8 中可以看到。

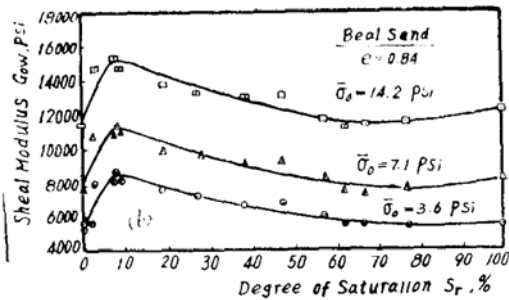


图6 砂土的  $G_o-S_r$  关系(引自吴世明1983)

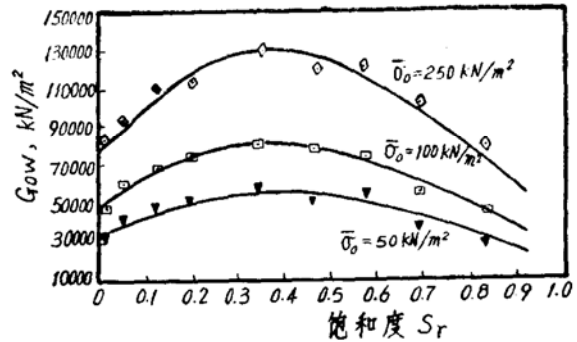


图7  $G_o$  与  $S_r$  的关系(谏壁灰)

从机理上解释, 由于非饱和粉煤灰中的毛细张力作用, 使颗粒间的有效应力增加, 从而使粉煤灰的动剪切模量提高。但是当  $S_r \geq S_o$  以后, 粉煤灰已近乎饱和, 颗粒表面聚集了较多的可流动水, 这层水膜减少了颗粒间的有效应力, 因而使  $G_o$  下降到  $G_{od}$  以下。

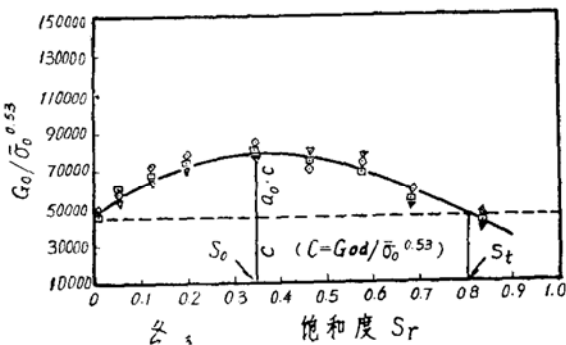


图8 归一化试验结果与经验公式的配合(谏壁灰)

量, 如式 1。

$f(S_r)$  称饱和度函数, 描述饱和度对模量的影响。

比较图 6, 图 7, 发现砂和粉煤灰两种不同材料的  $G_o-S_r$  关系有些类似。但粉煤灰的动力最佳饱和度  $S_o$  比砂的要明显大许多。这可能是由于粉煤灰颗粒表面存在许多微气孔, 一部分水进入了气孔后没能产生毛细张力的缘故。

将图 7 的试验结果按  $\bar{\sigma}_o$  归一, 可得到图 8 的归一化曲线。由最小二乘法拟合,  $G_o$  与  $S_r$  有以下关系:

$$G_o = G_{od} \cdot f(S_r) \quad (3)$$

式中  $G_{od}$  为干粉煤灰小应变动剪切模

$$f(S_r) = \begin{cases} 1 + a_o \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{S_r}{S_o}\right) & (S_r \leq S_o) \\ 1 + a_o \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{(S_r - S_o)}{(S_r - S_t)}\right) & (S_r > S_o) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $a_o$ 、 $S_o$ 、 $S_t$ 均为由试验确定的常数(见图 8 中所示)。其中 $a_o$ 可由下式表示:

$$a_o = \frac{G_o/\bar{\sigma}_o^{0.58}}{G_{od}/\bar{\sigma}_o^{0.58}} - 1 \quad (5)$$

将式(4)的饱和度函数代入式(3),我们就可以计算任一饱和度条件下的小应变动剪切模量。

### (三)粉煤灰的低密度、低模量特性

为了比较粉煤灰动剪切模量与砂动剪切模量的差异,笔者用萧山细砂(呈角砾状)在相同的自振柱仪上进行了试验;并在相对密度为50%的条件下,对比了萧山细砂与粉煤灰的动剪切模量和孔隙比(见表 4)。

表 4 砂、灰 剪 切 模 量、孔 隙 比 对 比 表

名 称	$D_r$ (%)	$e$	$G_o$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_{o灰}/G_{o砂}$ (%)	$e_{灰}/e_{砂}$
萧 山 砂	50	0.75	82,630		
徐 州 灰	50	1.26	48,330	58.5	1.68
谏 壁 灰	50	1.08	45,100	54.6	1.44
闵 行 灰	50	1.61	22,880	27.7	2.15

注:表中砂、灰的剪切模量均对应  $\bar{\sigma}_o = 100\text{kN/m}^2$

对比发现,在相同相对密度 $D_r = 50\%$ 的条件下,徐州、谏壁两种灰的动剪切模量约为萧山砂的 55~66%,闵行灰的动剪切模量约为萧山砂的 30%。但粉煤灰的孔隙比却是萧山砂的 1.44~2.15倍。

粉煤灰的这种低模量、低密度特性对工程隔震很有意义。利奥和桑格里(Liao、Sangrey)<sup>11</sup>(1978)通过声波在液体中传播的模型试验,对影响隔震效果的几个主要因素进行了研究。文章采用传递比 $TR$ 来描述隔震效果。

$$TR = \frac{(\text{某点隔震后的振幅})P_t}{(\text{某点隔震前的振幅})P_o} \quad (6)$$

通过研究发现,隔震桩与周围介质的阻抗比 $IR$ 越小,隔震效果越好,(如图 9 所示)。

$$IR = \frac{\rho_{桩} \cdot V_{s,桩}}{\rho_{介质} \cdot V_{s,介质}} \quad (7)$$

式中  $\rho_{\text{桩}}$ 、 $V_{s\text{桩}}$  分别表示隔震桩的密度和剪切波波速,相应地,  $\rho_{\text{介质}}$ 、 $V_{s\text{介质}}$  分别表示周围介质的密度和波速。

从图 9 中看出,当隔震桩与周围介质的阻抗比  $IR$  为 60% 时,隔振后的波幅衰减了一半,  $TR \approx 50\%$ 。

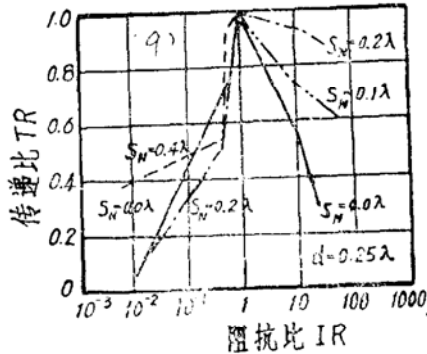


图 9 (引自利奥、桑格里1978)

1.54。在风干状态下,阻抗比

$$IR = \frac{\rho_{\text{灰}} \cdot V_{s\text{灰}}}{\rho_{\text{砂}} \cdot V_{s\text{砂}}} \sqrt{\frac{\gamma_{d\text{灰}} \cdot G_{s\text{灰}}}{\gamma_{d\text{砂}} \cdot G_{s\text{砂}}}} = 0.58$$

从图 9 上可查得,相应阻抗比 58% 的传递比  $TR$  约等于 50%。因此,从初步的分析来看,粉煤灰这种工业废料作为隔震材料是较有效果的。

## 五、结 论

粉煤灰是一种低密度、高孔隙比、表面带有微气孔的无粘性细颗粒材料,它的动剪切模量有以下特点:

1. 粉煤灰动剪切模量随孔隙比的增加而下降,随周围有效应力的增加而上升。
2. 粉煤灰的动剪切模量还受颗粒尺寸,表面形状和级配的影响。
3. 干粉煤灰的动剪切模量可由式(1)来估算。
4. 饱和度是影响粉煤灰动剪切模量的一个重要因素,大多数情况下,非饱和粉煤灰的剪切模量比干粉煤灰要高。
5. 饱和度对动剪切模量的定量影响可由式(3)来估算。
6. 动剪切模量与饱和度、孔隙比的关系均可按  $\bar{\sigma}_v^{0.58}$  进行归一。
7. 在相同相对密度条件下,徐州、谏壁两种灰的动剪切模量约为萧山砂的 55~60%。闵行灰的动剪切模量约为萧山砂的 30%。粉煤灰的低模量、低密度特性使粉煤灰有可能成为工程上有实用意义的隔震材料。

## 参 考 文 献

- [1] Gray, D.H. & Lin, Y.K., Engineering Properties of Compacted flyash., ASCE, 1972, pp.361~380.
- [2] Gatti, G. & Tripiciano, L., Mechanical behavior of coal flyashes., X ICSMFE,

假设把粉煤灰作为隔震桩,萧山砂为周围介质,利用利奥的研究成果(图 9),可粗略地估算粉煤灰隔震桩在砂土地基中的隔震效果。

偏保守一些进行估算,以谏壁灰为隔震桩材料,比重  $G_s = 2.02$ ,由表 4,当  $D_r = 50\%$  时,谏壁灰的孔隙比  $e = 1.08$ ,  $\gamma_d = G_s / (1 + e) = 0.97$ 。

萧山砂的比重  $G_s = 2.7$ ,由表 4,当  $D_r = 50\%$  时,孔隙比  $e = 0.75$ ,  $\gamma_d = G_s / (1 + e) =$



- Vol. 2, 1981, pp317~322.
- [3] Ballisager, C.C. & Scorensen, J.L., Flyash as fill Material, X ICSMFE, Vol.2, 1981, pp293~302.
- [4] Fang, H.Y. etc., Dynamic Properties of flyash, Soil Dynamics & Earthquake Engineering Conference, 1982.
- [5] Bros, B., Pollution from Ash Lagoons and use of Ash for Embankments, X ICSMFE, Vol.2, 1981, pp309~312.
- [6] 中华人民共和国水电部, 土工试验规程, SDS01-79, 上、下册, 水利电力出版社, 1981.
- [7] 顾尧章等, 土动力学中的自振柱试验, 土木工程学报, 1984年, 第2期.
- [8] 吴建平, 粉煤灰动剪切模量的试验研究, 浙江大学硕士学位论文, 1984.
- [9] 曾国熙, 正常固结粘土不排水剪切的归一化性状, 软土地基学术讨论会论文选集, 水利出版社, 1980, 第13~16页.
- [10] Wu, S.M., Capillary Effects on Dynamic Modulus of Fine-grained Cohesionless Soils, 1984. ASCE, Vol. 110, GT9, PP. 1188~1203.
- [11] Liao, S. & Sangrey, D.A., Use of Piles as Isolation Barriers, J. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, GT. 9, 1978, pp1139~1152.

### 附录一 符号说明

下列符号在本文中为:

- $G$ ——动剪切模量;
- $G_o$ ——小应变动剪切模量;
- $G_{od}$ ——干粉煤灰小应变动剪切模量;
- $e$ ——孔隙比;
- $\bar{\sigma}_o$ ——周围有效应力;
- $S_r$ ——饱和度;
- $S_o$ ——动力最佳饱和度;
- $S_t$ ——临界饱和度。

## Dynamic Shear Moduli of Flyashes

Zhen Guo-xi Gu Rao-zhang Wu Jian-ping

(Zhejiang University, Hangzhou)

### Abstract

Flyashes from three power plants of China were studied with Free Vibration Test System. It is found that the dynamic shear moduli increase as confining pressure increases and decrease as void ratio increases. The size grade and appearance of grain will also influence the shear moduli. The change of the degree of saturation will cause the change of dynamic shear moduli. By comparison, it is shown that dynamic shear moduli of flyashes are about 30~60% moduli of sand at same relative density.

According to the comparison and analysis, we can infer that flyashes will most likely be effective isolation materials in ground.