

# 城市固体废弃物动力特性试验研究

冯世进<sup>1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>, 孔宪京<sup>2</sup>, 邹德高<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点试验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 参照杭州天子岭填埋场城市固体废弃物 (MSW) 主要成分, 人工配制固体废弃物试样, 利用中型动三轴试验仪研究其在较大应变范围内 MSW 的动力特性。MSW 的动剪切模量  $G_d$  和阻尼比  $D$  随着动剪应变  $\gamma_d$  的变化曲线与泥炭土的相关曲线形状基本一致, 并且在相同应变时数值相差不大。在相同的动剪应变水平下, 随着围压的增大,  $G_d$  增加而  $D$  减小; 当动剪应变增大时,  $G_d$  减小而  $D$  增大。由于 MSW 的高压压缩性, 初始孔隙比不同对试样的动力特性影响不大。同时进行了现场剪切波速试验, 确定了最大动剪切模量  $G_{dmax}$  的估算式。为便于应用, 建议了归一化  $G_d$  和  $D$  与动剪应变依赖关系的取值范围和平均值曲线, 并将其与 OII 填埋场 MSW 动力特性的研究结果进行对比, 可以看出 MSW 的成分对其动力特性的影响还是比较大。

**关键词:** 城市固体废弃物; 动三轴试验; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: X 705

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2005)07 - 0750 - 05

**作者简介:** 冯世进(1978 - ), 男, 安徽东至人, 博士研究生, 主要从事桩基和环境土工方面的研究。

## Experimental research on dynamic properties of municipal solid waste

FENG Shi-jin<sup>1</sup>, CHEN Yun-min<sup>1</sup>, KONG Xian-jing<sup>2</sup>, ZOU De-gao<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** To investigate the dynamic properties of municipal solid waste (MSW) in the range of large strain, dynamic triaxial tests were conducted using moderate-scale triaxial apparatus on MSW samples simulating the compositions of MSW from Hangzhou Tianziling Landfill. It is concluded that the relationships of dynamic shear modulus and damping ratio versus dynamic shear strain of MSW are similar to those of peaty soil. The dynamic shear modulus increases and damping ratio decreases as the confining pressure increases under the same dynamic shear strain level, but the dynamic shear modulus decreases and damping ratio increases as the dynamic shear strain increases under the same confining pressure. Because of the high compressible property of MSW, the influence of initial void ratio is very little. At the same time, a formula for evaluating the maximum dynamic shear modulus is proposed on the basis of experimental results of shear wave velocity. The ranges of variation and average curves of the normalized dynamic shear modulus and damping ratio versus dynamic shear strain are proposed, which are compared with those of OII landfill. It is found that the composition of MSW affects significantly its dynamic properties.

**Key words:** municipal solid waste; dynamic triaxial apparatus; dynamic shear modulus; damping ratio

## 0 引言

随经济发展, 各城市产生的固体废弃物 (简称 MSW) 越来越多, 卫生填埋法是目前处理城市固体废弃物的主要方法。卫生填埋场也同其他构筑物一样, 会受到动力荷载的作用, 如果渗滤液和气体收集系统发生破坏, 填埋场将不能正常运转, 隐患很大; 如果发生滑坡, 对周边环境将会产生灾难性后果。对卫生填埋场进行动力分析的方法是在地基和土坡动力分析方法基础上发展起来的, 目前比较常用的有拟静力法、等价线性分析法和非线性分析法, 但无论哪种分析方

法, 都要求确定城市固体废弃物的动力特性。

由于 MSW 组成成分复杂, 以及获取代表性试样的困难, 目前对于 MSW 动力特性的研究主要是基于美国 OII (Operating Industries Inc) 填埋场在多次地震过程中的地震动监测记录的反分析, 主要包括有一维等价线性分析、非线性瞬态分析及二维等价线性分析,

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金资助项目 (50425825); 教育部高校青年教师奖励基金资助项目; 大连理工大学海岸和近海工程国家重点试验室主任基金资助项目 (LP0202)

**收稿日期:** 2004 - 08 - 13

这些都是通过试算法拟合记录曲线和计算曲线来确定其动力特性, 分析中一般假定能量耗散是与频率无关的结构阻尼引起的<sup>[1]</sup>。在反分析中, Idriss<sup>[2]</sup>计算结果表明剪切模量和阻尼比随剪应变幅发生显著变化; 而 Matasovic, et al<sup>[3]</sup>得出的剪切模量和阻尼比在应变小于 0.08% 时却变化很小。Morochnik V, et al<sup>[4]</sup>采用强地震动记录、有效原位测试及简化的物理模型发现 OII 填埋场 MSW 材料在整个地震过程中仍呈现线性粘弹性性状, 尽管 OII 填埋场在地震过程中产生了约 0.08% 的剪应变, 但其剪切模量随剪应变的减小基本可忽略不计, 在频率范围为 0.1~10 Hz 时, 可发现阻尼与频率相关。Matasovic, et al<sup>[5]</sup>采用原位测试、室内循环直剪试验和反分析的方法对 OII 填埋场 MSW 的动力性状进行了研究, 模量衰减和阻尼变化曲线表明 OII 填埋场 MSW 在中小应变下是一个良好的线性材料, 但当循环应变超过 0.1% 时, 剪切模量会显著减小。Augello<sup>[6]</sup>运用了 QUAD4M 计算程序进行了反分析, 表明 MSW 材料剪切模量衰减和阻尼曲线较好的呈现出中塑性粘土的特征。因计算模型的不同, 参数选取的变化, 及反分析方法本身存在的不确定性, 使得不同学者间计算结果也有很大差异, 对 OII 填埋场材料动力特性的反分析主要是基于应变小于 0.08% 情况下进行的, 对于 MSW 在大应变下的动力特性如何变化, 需要进一步研究。由于动力分析方法的精度所产生的误差远远低于城市固体废弃物动力特性的离散性和不确定性所带来的误差, 所以对于 MSW 动力特性的研究非常迫切, 在我国还未见相关报道。

## 1 试样的配制和试验仪器的介绍

进行中型动三轴试验试样尺寸很大, 即使从现场取得原状样也要经过重塑后, 配制成试验用样。由于张振营等<sup>[7]</sup>已经在杭州天子岭卫生填埋场取得大量试样进行了 MSW 的物理性质指标试验, 并得出了 MSW 中各成分的含量及颗粒相对体积质量, 见表 1。本文参照杭州天子岭卫生填埋场典型的 MSW 组分, 人工配制试验用样, 试样的尺寸为: 直径 20 cm, 高度 50 cm。考虑填埋场顶部和中部两种情况, 分别配制初始孔隙比  $e=3$  和  $e=2$  的两种试样 (即初始密度不同)。根据已知的孔隙比、试样体积和体积质量, 确定配制试样的总质量, 然后根据每种成分的含量, 分别确定

表 1 杭州市天子岭卫生填埋场 MSW 的组份

Table 1 Composition of MSW in sanitary fill of Tianziling, Hangzhou

成分	菜叶、肉骨	土、石、砖、煤渣	废纸	橡胶	塑料	纤维	玻璃	金属	陶瓷	果核	草木
含量/%	17.1	56.9	4.2	0.6	6.7	7.6	0.5	1.2	0.3	0.4	4.5
相对体积质量	2.15	2.55	1.2	0.66	1.4	1.5	2.5	7.8	2.8	1.0	1.5

注: 菜叶: 肉骨=2:3, 土: 石: 砖: 煤渣=14:1:1:4

其质量, 每个试样分 6 层击实。

试验是在大连理工大学抗震研究室的中型动三轴仪上进行, 中型动三轴试验仪主要由 5 部分组成: ①液压伺服加载系统, 最大动力荷载为 100 kN, 最大轴向位移  $\pm 50$  mm; ②模控和数控系统, 液压伺服模控部分采用日本岛津制作所的 4826 型模控器, 数控系统采用国产 SC52 型号 16 位 D/A 板和数控软件 MS-1215; ③三轴压力室系统; ④量测、监视与管路系统, 除了作动器上的外置力传感器外, 为了消除传力轴上的摩擦所产生的误差, 在压力室内上压盘上设置了内置力传感器, 用于精确测定作用在试样上的轴力; ⑤数据采集、处理系统。

装样完成后, 采用二氧化碳法饱和。饱和后的试样再进行各向等压固结, 固结压力分别为 100, 200, 300 和 400 kPa。振动时采用不排水状态, 试验振动频率为 0.3 Hz。在同一固结压力下, 采用同一个试样, 改变 10~16 级动荷载连续进行试验。当第一级动荷载选择好后, 即开机振动, 同时测记动应力、动变形和动孔隙水压力, 达到预定振次后停机, 并立即打开排水阀消除孔压; 然后再关阀进行下一级加荷试验。试验中每级荷载振动 12~15 次, 不同的加荷周次实测的应力-应变滞回曲线多少有些差别, 由此算出的  $G_d$  和  $D$  也不完全一样。因此, 在分析整理试验成果时, 轴向应变、 $G_d$  以及  $D$  均以第 3~10 次的平均值给出。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应变的影响

图 1, 2 分别为  $e=3$  的试样, 应变水平  $\gamma_a$  对  $G_d$  和  $D$  的影响曲线。当  $\gamma_a$  增大时,  $G_d$  随之减小而  $D$  逐渐增大。当  $\gamma_a$  约小于 0.05% 时,  $G_d$  衰减缓慢,  $D$  基本不变化, 当  $\gamma_a$  在 0.05~2% 范围时,  $G_d$  衰减最快,  $D$  增加最快, 当  $\gamma_a$  约大于 2% 时,  $G_d$  衰减趋缓。  $D$  的增长速度也变得缓慢。城市固体废弃物的  $G_d$  和  $D$  随着动剪应变  $\gamma_a$  的变化曲线与泥炭土的相关曲线形状基本一致, 并且在相同应变时数值相差不大, 这主要是由于它们都具有相对较低的密度和较高的压缩性所致。

### 2.2 围压的影响

可以发现, 在相同的  $\gamma_a$  条件下, 随着围压的增大,  $G_d$  增加。在  $\gamma_a$  较小时, 围压不同,  $G_d$  相差较大; 而  $\gamma_a$

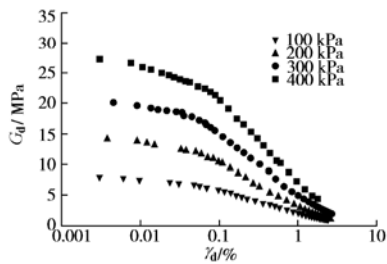


图1  $e=3$  试样动剪切模量随动剪应变的变化曲线

Fig. 1 Curves of dynamic shear modulus  $G_d$  versus dynamic shear

strain  $\gamma_d$  (sample with  $e=3$ )

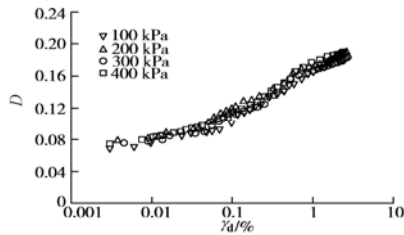


图2  $e=3$  试样阻尼比随动剪应变的变化曲线

Fig. 2 Curves of damping ratio  $D$  versus dynamic shear strain  $\gamma_d$  (sample with  $e=3$ )

较大时, 围压不同,  $G_d$  相差较小。在整个应变范围内, 围压对  $D$  的影响不甚敏感。

### 2.3 初始孔隙比的影响

图3, 4为  $e=2$  和  $e=3$  的试样在围压为 300 kPa 时  $G_d$  和  $D$  的对比关系曲线, 可发现  $G_d$  和  $D$  都较接近, 在其他围压条件下也相类似。虽然  $e=2$  和  $e=3$  相差较大, 由于城市固体废弃物的高压缩性, 在相同围压下固结后, 试样都变得非常密实, 孔隙比相差有所减小。由于城市固体废弃物含有大量塑料、橡胶、纤维、纸张等易变形成分, 这些成分的材料特性对于 MSW 的动力特性影响很大, 所以在围压相同时, 即使密实度有所差别, 但差别不大时, 城市固体废弃物这种特殊的复合材料所表现的动力特性也相差不大。

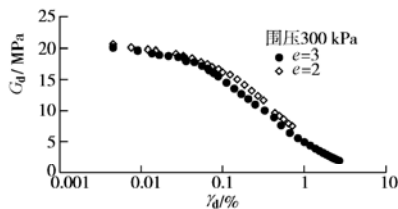


图3  $e=3$  和  $e=2$  试样动剪切模量对比曲线

Fig. 3 Comparison of dynamic shear modulus between samples  $e=3$  and  $e=2$

## 3 动剪切模量和阻尼比的确定

### 3.1 最大动剪切模量 $G_{dmax}$ 的确定

规范建议用  $1/G_d$  与  $\gamma_d$  关系在纵轴上截距的倒数求

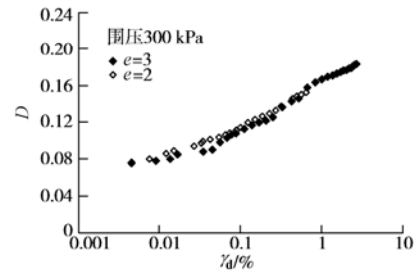


图4  $e=3$  和  $e=2$  试样阻尼比对比曲线

Fig. 4 Comparison of damping ratio between samples with  $e=3$  and  $e=2$

出  $G_{dmax}$ , 事实上, 这种方法是基于双曲线模型的假定。对于城市固体废弃物来说, 在整个应变范围内,  $1/G_d - \gamma_d$  关系并不一定满足直线关系, 而在较小应变  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  范围内,  $1/G_d - \gamma_d$  基本满足直线关系, 可以推求出  $G_{dmax}$ 。

为与现场情况进行对比, 采用表面波频谱分析法 (SASW) 在杭州天子岭填埋场进行了现场试验, 得到相速度随波长变化的关系曲线, 即弥散曲线, 然后用反分析的方法, 从弥散曲线得到剪切波速随土层深度的变化, 图5为现场3个不同位置的平台得到的平均剪切波速随深度的变化曲线, 可以发现随着深度增加, 剪切波速在逐渐增大, 在较浅的部位, 波速较大, 这是由于在填埋场顶部有 2 m 左右的覆盖土层<sup>[8, 9]</sup>。与 Matasovic N<sup>[5]</sup>对 OII 填埋场 27 个测点得到的平均剪切波速相比, 本文测试的剪切波速偏小, 这主要是由于 MSW 密度差别较大所致, 根据张振营等对天子岭填埋场三个钻孔的天然密度试验<sup>[7]</sup>, 如图6所示, 天子岭填埋场 MSW 的天然密度主要在  $0.79 \sim 1.44 \text{ g/cm}^3$  之间, 平均天然密度为  $1.04 \text{ g/cm}^3$ , 而 OII 填埋场的 MSW 平均天然密度为  $1.57 \text{ g/cm}^3$ , 比天子岭填埋场要高的多。当然, 两个填埋场成分不同, 对 MSW 的剪切波速也有些影响。

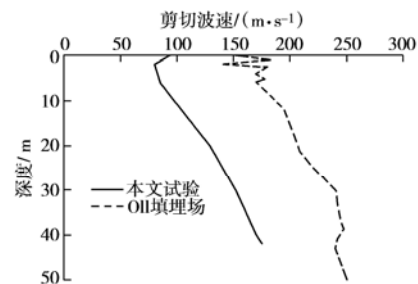


图5 剪切波速随着深度的变化

Fig. 5 Curves of shear wave velocity versus depth

通过现场的剪切波速试验和密度试验, 可以计算不同深度的城市固体废弃物的最大动剪切模量,

$$G_{dmax} = \rho \times V_s^2, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为 MSW 的天然密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V_s$  为剪切波速 ( $\text{m/s}$ )。不同深度的平均有效主应力  $\sigma_m$  可得:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(1+\nu)(1+K)\rho gz \quad (2)$$

式中  $\nu$  为泊松比, 取 0.33 (根据 N.Matasovic 现场试验得到);  $K$  为主应力比, 取 1.5;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $z$  为深度。

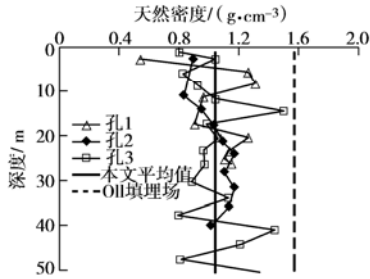


图 6 天然密度随着深度的变化

Fig. 6 Curves of unit weight versus depth

通过上面两种方法得到不同平均有效主应力的  $G_{dmax}$  如表 2 所示, 可以发现  $e=2$  和  $e=3$  的试样, 在不同平均有效主应力下的  $G_{dmax}$  比较接近, 但是现场试验得到的  $G_{dmax}$  比室内试验要高, 这是由于现场试验试样的应变量级在  $10^{-6}$ , 而室内试验试样的最小应变量级在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。虽然室内试验的试样是按照现场试样的配比较配的, 但是结构性远较现场试样差, 这对剪切波速也有影响。本文采用现场剪切波速试验得到的结果作为不同平均主应力的  $G_{dmax}$ 。

表 2 不同平均有效主应力的最大动剪切模量

Table 2 The maximum dynamic shear modulus  $G_{dmax}$  under different  $\sigma_m$

试验方法	$e$	$G_{dmax}/\text{MPa}$			
		$\sigma_m=100 \text{ kPa}$	$\sigma_m=200 \text{ kPa}$	$\sigma_m=300 \text{ kPa}$	$\sigma_m=400 \text{ kPa}$
室内试验	$e=3$	7.85	14.46	20.15	27.49
室内试验	$e=2$	8.75	14.52	20.7	28.11
现场试验		9.52	16.57	22.92	28.86

$G_{dmax}/P_0$  与  $\sigma_m/P_0$  在双对数坐标下可以近似为直线关系 ( $P_0$  为大气压力)。通过线性回归分析, 得到城市固体废弃物的  $G_{dmax}$ :

$$G_{dmax} = 95P_0 \left(\frac{\sigma_m}{P_0}\right)^{0.8} \quad (3)$$

对于不同初始孔隙比的试样, 在相同的固结压力下由于 MSW 的高压缩性, 最后得到的  $G_{dmax}$  相差不大, 所以在式 (3) 中就没有考虑孔隙比的影响。

### 3.2 归一化动剪切模量 $G_d/G_{dmax}$ 和阻尼比 $D$ 与动剪应变 $\gamma_d$ 的关系

图 7 给出了试样  $e=2$  和  $e=3$  的归一化动剪切模量与动剪应变的关系曲线, 可以发现归一化动剪切模量随动剪应变增大而衰减, 其衰减的程度主要受围压  $\sigma_c$  或平均有效主应力  $\sigma_m$  的影响, 围压越低, 归一化动剪切模量衰减越快 (即衰减曲线偏向左侧), 这一现象与砂的研究成果相类似。尽管试样的孔隙比不同,

围压不同, 归一化动剪切模量随着动剪应变的衰减虽有所区别, 但离散性并不大, 所有曲线还是基本处在一个狭窄的区域内。为便于应用, 将图 7 中所有试样的试验结果再做平均处理, 建议了与本文成分相近的 MSW 材料归一化动剪切模量与动剪应变依赖关系的取值范围, 如图 8 所示。

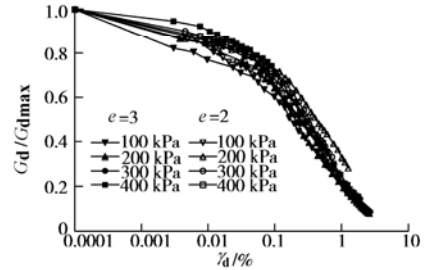


图 7 归一化动剪切模量与动剪应变关系曲线

Fig. 7 Curves of normalized dynamic shear modulus versus dynamic shear strain

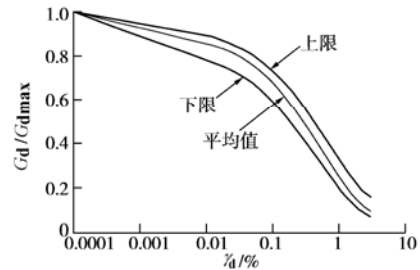


图 8 归一化动剪切模量与动剪应变关系取值范围

Fig. 8 Range of variation of normalized dynamic shear modulus versus dynamic shear strain

图 9 给出了试样  $e=2$  和  $e=3$  的阻尼比与动剪应变的关系曲线, 试样的孔隙比不同, 围压不同, 阻尼比随着动剪应变的增长规律也有所区别, 但离散性并不大, 所有曲线也是基本处在一个狭窄的区域内。将图 9 中所有试样的试验结果再做平均处理, 建议了与本文成分相近的 MSW 材料阻尼比与动剪应变依赖关系的取值范围, 如图 10 所示。

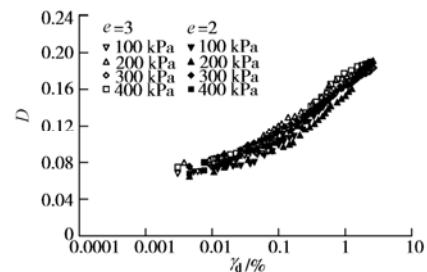


图 9 阻尼比与动剪应变关系曲线

Fig. 9 Curves of damping ratio versus dynamic shear strain

图 11, 12 分别将本文得到的 MSW 归一化动剪切模量和阻尼比与动剪应变关系的均值曲线与国外其他作者对 OII 填埋场 MSW 动力特性的研究成果进行比较。从图中可以发现, 不同作者对 OII 填埋场 MSW 动

力特性的分析结果有所不同。本文得到的 MSW 归一化动剪切模量与动剪应变关系的均值曲线, 在  $\gamma_d < 0.03\%$  时, 与 Idriss, et al<sup>[2]</sup> 反分析结果比较吻合, 当  $\gamma_d > 0.03\%$  时, 处在 Matasovic N, et al<sup>[5]</sup> 通过反分析和循环直剪试验推荐的上限值和平均值之间。从总体上分析, 曲线形态比较接近, 只是数值上有所差别, 这与城市固体废弃物的不同组成有很大关系。与 Idriss, et al<sup>[2]</sup> 反分析结果和 Matasovic N, et al<sup>[5]</sup> 推荐的上限值和平均值曲线相比较, 在  $\gamma_d > 0.03\%$  时, 阻尼比要小; 在  $\gamma_d < 0.03\%$  时, 都比较接近。由此可以发现, 城市固体废弃物的成分对其动力特性的影响还是比较大, 对于不同地区不同组成的城市固体废弃物, 应进一步研究, 以确定各种不同组成对动力特性的影响。

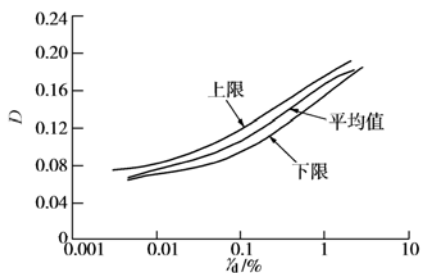


图 10 阻尼比与动剪应变关系取值范围

Fig. 10 Range of variation damping ratio versus dynamic shear strain

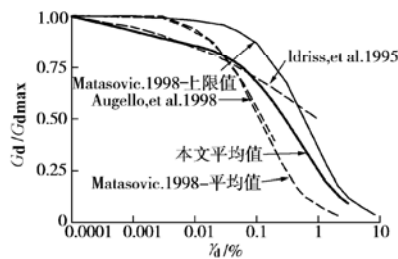


图 11 MSW 归一化动剪切模量与动剪应变对比关系曲线  
Fig. 11 Comparison of normalized dynamic shear modulus versus dynamic shear strain

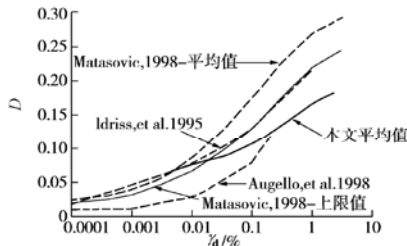


图 12 MSW 阻尼比与动剪应变对比关系曲线

Fig. 12 Comparison of damping ratio versus dynamic shear strain

## 4 结 语

MSW 的动力特性试验研究是地震等动荷载作用下卫生填埋场进行动力分析的基本依据, 我国在这方

面的研究还未见报道, 国外发达国家对其研究也是刚刚开始。该研究结果对与本文成分相近的卫生填埋场的动力特性参数的选取有较好的参考作用。

(1) MSW 的  $G_d$  和  $D$  随着  $\gamma_d$  的变化曲线与泥炭土的相关曲线形状基本一致, 并且在相同应变时数值相差不大。

(2) 在相同的剪应变水平下, 随着围压的增大,  $G_d$  增加而  $D$  减小; 当剪应变增大时,  $G_d$  减小而  $D$  增大。即使初始孔隙比相差较大的试样, 由于 MSW 的高压缩性, 固结后密实度相差不大, 对其动力特性影响较小。

(3) 分别利用现场剪切波速试验和室内动三轴试验的结果确定 MSW 的  $G_{dmax}$ , 并给出了其表达式。

(4) 为便于应用, 建议了归一化动剪切模量和阻尼比与动剪应变依赖关系的取值范围和平均值曲线, 并将其与 OII 填埋场 MSW 动力特性的研究结果进行对比, 可以看出 MSW 的成分对其动力特性的影响还是比较大。

## 参考文献:

- [1] 周 健, 贾敏才. 固体废弃物堆埋场抗震稳定性研究现状[J]. 世界地震工程, 2001, 17(3): 38 - 42.
- [2] Idriss I M, Fiegel G, Hudson, M B, et al. Seismic Response of Operating Industries Landfill[A]. Earthquake design and performance of solid waste landfills[C]. ASCE Geotechnical Special Publication, 1995, 54, 83 - 118.
- [3] Kavazanjian E Jr, Matasovic N. Seismic Analysis of Solid Waste landfills[A]. Geoenvironmental 2000[C]. ASCE Geotechnical Special Publication, 1995, 46(2): 1066 - 1080.
- [4] Morochnik J P, Bardet B, Hushmand. Identification of Dynamic Properties of OII Landfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(3): 186 - 196.
- [5] Matasovic N, Kavazanjian E Jr. Cyclic Characterization of OII Landfill Solid Waste[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(3): 197 - 210.
- [6] Augello A J, Brav J D, et al. Dynamic Properties of Solid Waste Based on Back-Analysis of OII Landfill [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(3): 211 - 222.
- [7] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 城市生活垃圾土性参数的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 35 - 39.
- [8] 柯 瀚. 城市固体废弃物填埋场的沉降、静力和动力稳定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [9] 陈云敏, 柯 瀚, 凌道盛. 城市垃圾填埋体的动力特性及地震响应[J]. 土木工程学报, 2002, 35(3): 66 - 72.