

文章编号: 0559-9350 (2003) 04-0024-06

饱和尾矿料动力变形特性的试验研究

阮元成¹, 郭新²

(1. 中国水利水电科学研究院 抗震中心, 北京 100044; 2. 郑州市燃气集团公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 介绍对两种饱和尾矿料(尾矿砂和尾矿泥)的动力变形特性进行的一系列试验研究。试验结果表明, 饱和和疏松的尾矿料具有敏感的不稳定结构, 在往返加荷条件下, 同一种尾矿料对于不同的固结比, 其压力效应的试验结果可以近似地用同一条直线来表示。在固结应力条件和振动次数一定时, 饱和尾矿料的残余轴应变随动剪应力比的增大而增大, 其变化规律不仅在双对数坐标中呈线性关系, 而且, 在较小的动剪应力比变化范围内试样就会因残余轴应变的迅速增大而进入破坏状态。

关键词: 尾矿料; 动力变形特性; 矿物成分

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

我国现今的尾矿坝大部分都是用上游法建造的。这些尾矿坝以及尾矿库中的尾矿料, 通常处于饱和的疏松状态, 颗粒较细, 比重较大, 由于颗粒组成、矿物成分等因素的影响, 它们看似稳定, 实际上对扰动非常敏感, 在地震中很容易发生液化和破坏性变形, S. G. Vick 指出^[1]: “迄今所报道的所有在地震中发生流动破坏的尾矿坝都是用上游法建造的。”不仅是设计和建造方法使得当前我国已建的尾矿坝有不少具有潜在的危险, 而且, 为了节省占地费和居民的动迁费, 减少环境污染, 有的矿山工业还在废弃的尾矿库上建起了高达百米左右的排土场, 排土场的地基大部分是位于水下的尾矿料, 这些饱和的尾矿料在地震情况下的动强度、动变形、液化特性以及稳定性, 都是需要进行试验研究的问题。迄今为止, 对于尾矿料动力特性的研究, 我国虽然已经开展了一些工作, 并取得了一些成果, 但是, 和天然土料的研究成果相比, 还远远不够, 可参考的尾矿料动力特性的资料还比较少, 特别是矿石的种类繁多, 矿物的化学成分复杂, 进一步增加了对尾矿料研究的难度。另一方面还存在着人为的社会因素, 由于对于尾矿料的研究和尾矿坝的建造, 需要投入大量的经费, 这种投资要加到矿业的成本上, 从某些方面看又无法收回, 这就使得不少的矿业部门对于这方面的研究主动性不够。加强对尾矿料动力特性的研究, 开展对尾矿坝和废弃尾矿库的利用工作, 对于节省投资、减少环境污染, 保障工程的安全, 具有重要的社会意义和现实意义。

作者通过对饱和尾矿料的一系列试验, 研究了尾矿料在往返加荷条件下的动力变形特性, 对用尾矿料充填的地基土层不同于天然地基的某些现象进行了分析和讨论, 所得结论, 可为尾矿坝设计和废弃尾矿库的开发利用提供依据。

1 试验土样、仪器与方法

试验所用尾矿料取自一个铁矿的尾矿库。该尾矿库中的尾矿料大致可分为两种, 尾矿砂和尾矿泥, 大部分位于水下, 处于较为疏松的饱和状态。尾矿砂的比重为 2.88, 平均相对密度约为 0.49, 中间粒径约为 0.058mm, 属颗粒较细的尾粉砂, 其中还含有少量的尾细砂, 主要成分是石英, 不均匀

收稿日期: 2002-03-30

作者简介: 阮元成 (1945-), 男, 高级工程师, 主要从事土动力学研究。

系数为 4.1，属于不良级配；尾矿泥的比重为 2.84，饱和含水量为 34.9%，孔隙比为 0.99，中间粒径约为 0.006mm，根据液限和塑限试验结果，其液限为 29.2%，塑限为 23.0%，塑性指数只有 6.2，按塑性图分类，属于尾粉土，由颗分曲线可知，颗粒中小于 0.005mm 的粒径含量为 39%，在显微镜下观察，其颗粒中石英含量较多，粘土矿物颗粒较少，矿物成分具有尾矿砂的特点，试验中发现，它的亲水性很弱。由现场地质勘测资料分析，试验中所用的尾矿砂和尾矿泥，试样制备干密度分别取为 1.55g/cm^3 和 1.43g/cm^3 ，颗分曲线见图 1。

尾矿料的动力残余轴应变试验采用 DSZ-100 型电磁式动三轴仪和 S-3-D 型液压式动三轴仪。电磁式动三轴仪，试样尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，最大侧向应力为 0.5MPa，最大轴向应力为 1.0MPa；液压式动三轴仪，试样尺寸为 $\phi 100\text{mm} \times 210\text{mm}$ ($K_c = 1$) 和 $\phi 100\text{mm} \times 230\text{mm}$ ($K_c = 2$)，该仪器的最大侧向应力为 1.5MPa，最大轴向应力为 7.6MPa，以上两种动三轴仪的循环荷载激振频率均选用 1Hz，试验的激振波形采用正弦波。尾矿料的动剪模量和阻尼比试验是在 DTC-158-1 型共振柱仪上进行的。该仪器为底端固定、上端附有质量块的弹簧阻尼系统。仪器的最大侧向应力为 1MPa，最大轴向应力为 2.5MPa，可测试的剪应变幅范围为 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$ ，试样尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，有关参数和波形可通过仪器系统显示、记录并进行处理。

尾矿料动三轴试验的原理和方法以及共振柱试验的方法和资料整理按《土工试验规程、SL237-1999》进行^[2]。试验全部采用饱和试样。除尾矿砂在 DSZ-100 型电磁式动三轴仪上进行动力残余轴应变试验时采用煮沸饱和和水下装样外，其余试验均采用干装法，控制干密度装好干样后进行真空抽气，然后由底部通入脱气水进行饱和，使孔隙水压力系数 B 值达到 0.97 以上。饱和后在一定的固结应力条件下排水固结，而后，施加不同的动应力进行试验。

2 动剪模量和阻尼比

动剪模量与阻尼比特性试验是动力反应分析的基本依据之一，这些关系反映了在动荷载作用下土的应力应变关系的非线性与粘滞性特征。本项研究采用共振柱仪微小应变测试系统进行动力变形特性试验，分别测定了尾矿砂和尾矿泥的动剪模量与阻尼比，试验中动剪应变幅的测试范围为 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$ 。

图 1 尾矿砂和尾矿泥的颗分曲线

图 2 尾矿砂和尾矿泥的 $G_{\max}/Pa \sim \sigma_0/Pa$ 关系曲线

2.1 压力效应 通过共振柱的压力效应试验，分别得出尾矿砂和尾矿泥的最大动剪模量 G_{\max} 与平均有效主应力 $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的关系曲线，如图 2 所示。在双对数坐标中，最大动剪模量 G_{\max} 与平均有效主应力 σ_0 之间为直线关系，可以用如下的幂函数形式表示^[3]：

$$\frac{G_{\max}}{Pa} = C \cdot \left(\frac{\sigma_0}{Pa} \right)^n$$

(1)

表 1 尾矿砂和尾矿泥的动剪模量系数 C 与指数 n

现场命名	按照规范命名	干密度 / (g cm^{-3})	K_c	C	n
尾矿砂	尾粉砂	1.55	1	687.19	0.4350
			2	649.30	0.4144
尾矿泥	尾粉土	1.43	1	457.72	0.4397
			2	426.31	0.4750

式中： P_a 为大气压力， G_{\max} 、 G_0 、 P_a 采用同一量纲，动剪模量系数 C 与指数 n 由试验确定，尾矿砂和尾矿泥的试验结果列于表 1。

从图 2 中可以看出，无论是尾矿砂或者是尾矿泥，对于同一种尾矿料，在等压固结（ $K_c = 1$ ）和偏压固结（ $K_c = 2$ ）时压力效应的试验结果非常接近。在固结比相同的情况下，尾矿砂和尾矿泥的动剪模量指数 n 也是较为接近的，但是，这两种料的动剪模量系数 C 值还是有差别的，尾矿砂大约是尾矿泥的 1.5 倍左右，这种差别主要是由它们的颗粒组成和矿物成分等因素的不同造成的。

3.2 应变效应 通过共振柱的应变效应试验，分别给出了尾矿砂和尾矿泥在偏压固结 $K_c = 2$ 、侧压力 σ_3 分别为 100kPa、200kPa、500kPa、900kPa 时的动剪模量比 G/G_{\max} 与动剪应变幅 γ 、阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 的关系曲线，为了进行比较，同时还给出了尾矿砂和尾矿泥在等压固结 $K_c = 1$ 、侧压力 σ_3 为 900kPa 时的动剪模量比 G/G_{\max} 与动剪应变幅 γ 、阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 的关系曲线^[4]，如图 3~图 6 所示。可以看出，对于尾矿砂来说，当动剪应变幅 $\gamma < 10^{-5}$ 时，由于试样基本上处于弹性状态，不同初始应力条件下试样的动剪模量比 G/G_{\max} 与动剪应变幅 γ 的关系曲线差别不大，当 $\gamma > 10^{-5}$ 之后，试样的动剪模量比 G/G_{\max} 与动剪应变幅 γ 的关系曲线出现一个带形区域，在这个区域内，对于同一个动剪应变幅 γ ，动剪模量比 G/G_{\max} 随侧压力 σ_3 的增大而增大，也就是说， $\gamma = 10^{-5}$ 是不同初始应力条件下试样的动剪模量比 G/G_{\max} 与动剪应变幅 γ 关系曲线是否出现差别的分界点；而对于尾矿泥，由于颗粒组成和矿物成分的差别，更容易产生残余变形，所以，该分界点大约是在 3×10^{-6} 左右。从图中还可以看出，无论是尾矿砂或者是尾矿泥，当动剪应变幅 $\gamma < 10^{-4}$ 时，对于同一种尾矿料，不同初始应力条件下试样的阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 关系曲线差别不大，当动剪应变幅 $\gamma > 10^{-4}$ 之后，试样的阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 的关系曲线也出现了一个带形区域，在这个区域内，对于同一个动剪应变幅 γ ，阻尼比 D 随 σ_3 的增大而减小，也就是说， $\gamma = 10^{-4}$ 基本上是不同的初始应力条件

图 3 尾矿砂 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 关系曲线

图 4 尾矿砂 $D \sim \gamma$ 关系曲线

图 5 尾矿泥 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 关系曲线

图 6 尾矿泥 $D \sim \gamma$ 关系曲线

下试样的阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 关系曲线是否出现差别的分界点。以上的试验结果说明，动剪应变幅 γ 对于动剪模量的影响比对于阻尼的影响更为敏感一些。通过比较可以得出，由于尾矿砂和尾矿泥的颗粒组成和矿物成分等因素的不同，在相同的初始应力条件下，对于同一个动剪应变幅 γ 值，这两种料的动剪模量比 G/G_{\max} 和阻尼比 D 都有所不同，一般来说，当侧压力 $\sigma_3 < 500\text{kPa}$ ，动剪应变幅 $\gamma > 10^{-4}$ 时，尾矿砂的动剪模量比 G/G_{\max} 高于尾矿泥，而阻尼比 D 比尾矿泥低。

3 动力残余变形特性

根据动三轴试验结果，分别整理出了尾矿砂和尾矿泥在不同固结应力条件和动剪应力作用下尾矿料的残余轴应变 ϵ_{pa} 与动剪应力比 τ/σ_0 的关系曲线，如图 7 和图 8 所示。图中， τ 为试样 45° 剪切面上的动剪应力， $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为试样 45° 剪切面上的有效法向应力， σ_1 和 σ_3 分别为试样固结时的大、小主应力， ρ_d 为试样的干密度， N 为振动次数。从图中可以看出，尾矿料的残余轴应变 ϵ_{pa} 与固结应力条件 (σ_3 、 K_c) 和往返加荷条件 (τ/σ_0 、 N) 等有关，在固结应力条件和振动次数 N 一定时，残余轴应变 ϵ_{pa} 随动剪应力比 τ/σ_0 的增大而增大。由于饱和的尾矿料对于振动荷载非常敏感，当试样受到振动荷载作用时，较小的动应力就会使试样进入塑性变形阶段，一旦进入塑性变形阶段，在较小的动剪应力比范围内试样就会因残余轴应变 ϵ_{pa} 的迅速增大而进入破坏状态，在等压条件下，这种现象尤为突出。侧压力 σ_3 对残余轴应变 ϵ_{pa} 与动剪应力比 τ/σ_0 关系的影响，在等压固结 $K_c = 1$ 时不太显著，但是在偏压固结 $K_c = 2$ 时还是有影响的，对于同一种尾矿料，在相同的动剪应力比作用下，侧压力 σ_3 越大，残余轴应变 ϵ_{pa} 也就越大。

对尾矿砂和尾矿泥来说，无论是等压固结还是偏压固结，在固结应力条件和振动次数 N 一定时，残余轴应变 ϵ_{pa} 随动剪应力比 τ/σ_0 的发展变化，在双对数坐标中均呈线形关系。由于饱和尾矿料对于振动荷载具有特别的敏感性，动剪应力比的变化范围较小，根据试验结果，残余轴应变 ϵ_{pa} 与动剪

图 7 尾矿砂残余轴应变与动剪应力比的关系

应力比 τ/σ_0 的关系可用幂函数形式近似表示如下：

$$\tau/\sigma_0 = K(\epsilon_{pa})^m \tag{2}$$

经转换可得

$$\epsilon_{pa} = [(1/K) \cdot (\tau/\sigma_0)]^{1/m} \times 100(\%) \tag{3}$$

式中： K 、 m 分别是以 σ_3 、 K_c 和 N 为参变数的系数和指数，由试验结果确定，等效振次 $N_{eq} = 6$ 和 12 时不同固结应力条件下尾矿砂和尾矿泥的系数 K 和指数 m 值分别列于表 2。残余轴应变 ϵ_{pa} 以百分数计，动剪应力 τ 和有效法向应力 σ_0 采用相同的量纲。

图8 尾矿泥残余轴应变与动剪应力比的关系

表2 尾矿砂和尾矿泥的残余轴应变系数 K 与指数 m

现场命名	规范命名	干密度/ (g cm^{-3})	K_c	σ_3/kPa	$N_{eq} = 6$		$N_{eq} = 12$	
					K	m	K	m
尾矿砂	尾粉砂	1.55	1	900	0.212	0.077	0.14	0.187
			2	100 ~ 200	1.104	0.383	0.18	0.928
				500 ~ 700	1.181	0.530	0.08	1.240
尾矿泥	尾粉土	1.43	1	900	0.248	0.090	0.15	0.215
			2	100 ~ 200	0.315	0.145	0.15	0.300
				500 ~ 700	0.429	0.246	0.11	0.560

从表2可以看出，尾矿泥和尾矿砂的残余变形特性既有相近的特征，又有一些差别。由于尾矿泥中石英含量较大，亲水性弱，饱和含水量超过液限，塑性指数较小，其矿物成分和尾砂砂有着一定的近似性，它们都具有非常敏感的不稳定结构，所以，无论是尾矿砂或者是尾矿泥，在等压时不同侧压力条件下的残余变形特性没有显著的差别，其残余轴应变系数和指数都较为接近。但是，由于尾矿泥和尾矿砂的颗粒级配不同，其矿物成分也不完全相同，在偏压 $K_c = 2$ 的条件下，这两种尾矿料之间的残余轴应变系数和指数还是有所不同的，而且在残余轴应变 ϵ_{pa} 与动剪应力比 σ_3/σ_0 的关系曲线中可以看出，进入弹塑性变形阶段后到试样进入破坏状态前，尾矿砂的剪应力比变化范围比尾矿泥有所增大。

4 结论

(1) 按常规土分类，尾矿泥在塑性图中属粉土范围，应具有粘性土的特性，但是，由于其颗粒中石英含量较多，粘土矿物颗粒较少，矿物成分具有尾矿砂的特点，试验中表现为亲水性很弱，容易发生突然的破坏性应变，动力变形特性和尾矿砂非常相似，天然地基少粘性土层的一些规律和标准对于用尾矿泥充填的地基土层是不适用的。(2) 无论是尾矿砂还是尾矿泥，对于同一种尾矿料，在不同的固结比 ($K_c = 1$ 至 $K_c = 2$) 条件下，其压力效应的试验结果非常接近，在双对数坐标中可近似用同一条直线来表示；对于不同的尾矿料，在固结比相同，($K_c = 1$ 或 $K_c = 2$) 的条件下，饱和尾矿砂和尾

矿泥的最大动剪模量指数 n 较为接近, 但是, 它们的最大动剪模量系数 C 值是有差别的, 尾矿砂大约是尾矿泥的 1.5 倍左右。(3) 饱和的尾矿料对于振动荷载非常敏感, 当试样受到振动荷载作用时, 较小的动应力就会使试样进入弹塑性变形阶段, 一旦进入弹塑性变形阶段, 在较小的动剪应力比范围内试样就会因残余轴应变 ϵ_{pa} 的迅速增大而进入破坏状态。饱和尾矿泥的这种特点尤为明显, 不仅动剪应力比范围小, 而且动剪应力比的值也比较小, 一般不超过 0.25。(4) 在等压固结条件下, 侧压力 σ_3 对饱和尾矿料残余轴应变 ϵ_{pa} 与动剪应力比 τ/σ_0 关系的影响可以忽略不计, 但是在偏压固结 $K_c = 2$ 的条件下, 其影响还是应当考虑的, 对于同一种尾矿料, 在相同的动剪应力比作用下, 侧压力 σ_3 越大, 残余轴应变 ϵ_{pa} 也就越大。(5) 对饱和尾矿砂和尾矿泥来说, 无论是固结比 $K_c = 1$ 或 $K_c = 2$, 在固结应力条件和振动次数 N 一定时, 残余轴应变 ϵ_{pa} 随动剪应力比 τ/σ_0 的发展变化, 在双对数坐标中均呈线形关系。对振动荷载具有特别敏感性的饱和尾矿料, 动剪应力比的变化范围较小, 根据试验成果, 残余轴应变 ϵ_{pa} 与动剪应力比 τ/σ_0 的关系可用幂函数形式近似用式(2)和式(3)表示。

参 考 文 献:

- [1] Vick S G, Risk-Based Approach to Seismic Stability and Inundation Hazard for Upstream Tailings Dams [A]. Proc. International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams [C]. ICOLD, Sydney, Australia, May 23, 2, 1990.
- [2] SL237-1999, “土工试验规程” [S].
- [3] 阮元成. 重塑土的动力变形特性 [A]. 中国土木工程学会第六届土力学及基础工程学术会议论文集 [C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [4] 阮元成. 土的双曲线模型中修正系数的确定 [J]. 水利学报, 1991, (12): 69 ~ 76.

Experimental study on dynamic deformation properties of saturated tailings material

RUAN Yuan-cheng¹, GUO Xin²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Zhengzhou Gas Group Corporation, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The authors analyzed a series of experimental results about 2 saturated tailings material, tailings sand and tailings mud. These results showed that saturated loose tailings material had a sensitive unstable structure. Under cyclic loading and different consolidation ratio, the pressure effect of same tailings material may be expressed approximately as a straight line. When the consolidation stress and number of vibration were fixed, the residual axial strain of tailings material was increasing as the dynamic shear stress ratio increased. The varying curve was alinearity plot in log-log coordinate. The testing sample would present a failure state at a small varying range owing to rapid increase of the residual axial strain.

Key words: tailings material; dynamic deformation properties; mineral composition