

文章编号: 0559-9350 (2004) 01-0067-07

饱和尾矿料静、动强度特性的试验研究

阮元成¹, 郭新²

(1. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 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)的静、动强度特性进行的一系列试验研究。试验结果表明, 由于尾矿料颗粒组成、矿物成分等因素的影响, 用尾矿料充填的地基土层具有不同于天然地基的少黏性土层的特殊性。尾矿料颗粒较细, 比重较大, 石英含量较多, 亲水性弱, 饱和的疏松的尾矿料具有非常敏感的不稳定结构。不仅在往返加荷条件下动强度低, 动剪应力比变化范围小, 容易发生液化和破坏, 而且, 当尾矿料的密度小于某一临界值时, 静力条件下也会发生流滑而进入破坏状态。

关键词: 尾矿料; 静、动强度特性; 矿物成分

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

尾矿料是矿山工业的矿石废料, 以矿浆的形式用管道或水槽输送到适当的场地, 通过旋流器或重力法完成尾矿砂和尾矿泥的分离, 和输送水一起被尾矿坝拦在库里。由于尾矿坝建造方法的不同, 尾矿料或者沉积在尾矿库里, 或者做为坝体的一部分。就设计与建造方法而言, 我国现今的尾矿坝绝大部分是用上游法建造的, 这些尾矿库以及尾矿坝中的尾矿料通常是采用水力原理沉淀而成。用上游法设计和建造尾矿坝虽然简单易行, 节省经费, 但是还应该看到, 这些尾矿坝的地基大部分是位于水下的尾矿料。由于许多坝的排水系统不完善, 所以, 尾矿料基本上处于饱和状态且比较疏松。又由于尾矿料特有的物理力学性质, 其结果使得许多用上游法设计和建造的尾矿坝具有容易发生流滑破坏的潜在危险性^[1,2], 构成对生命、财产造成巨大损失的危险条件。鉴于以上情况, 这些饱和的疏松的尾矿料在地震情况下的应力-应变关系, 静、动强度特性以及稳定性, 都是需要深入研究认真解决的问题。

由于尾矿料的颗粒组成、矿物成分等因素的影响, 饱和尾矿料具有非常敏感的不稳定结构, 和天然土料相比, 其静、动强度特性都有显著的差异, 用尾矿料充填的地基土层具有完全不同于天然地基少黏性土层的特殊性。

作者研究了饱和尾矿料的静、动力强度特性。对其不同于天然土料的特殊性进行了分析和讨论, 并给出了研究中所用铁矿的饱和尾矿料的有关参数和指标。为尾矿坝设计和废弃尾矿库的开发利用提供依据和参考。

1 试验土样、仪器与方法

试验所用的土样为铁矿的尾矿砂和尾矿泥, 处于较为疏松的饱和状态。尾矿砂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, 属于不良级配。尾矿泥主要由细颗粒组成, 虽然颗粒中小于 0.005mm 的粒径含量较多, 达 39%, 但是, 根据液限和塑限试验结果, 塑性指标却比较小, 只有 6.2%, 按塑性图分类, 属于尾粉土, 说明尾矿泥的细颗粒中黏土矿物颗粒含量较少; 又因为液

收稿日期: 2002-08-29

作者简介: 阮元成 (1945-), 男, 高级工程师, 主要从事土动力学和土石坝抗震研究。

性指数已达 1.92，属于可液化土。为了进一步验证尾矿泥的这种特殊性，在显微镜下观察，也发现黏土矿物颗粒较少，同时发现其颗粒中石英含量较多，矿物成分具有尾矿砂的特点，因而，它的细颗粒亲水性很弱。由现场地质勘测资料确定，试验中所用的尾矿砂和尾矿泥，试样制备干密度分别取为 $1.55\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $1.43\text{g}/\text{cm}^3$ ，物理特性指标见表 1。

表 1 试样的物理特性指标										
土类	比重	孔隙比	饱和含水量 (%)	相对密度 (%)	液限 (%)	塑限 (%)	液指数性	中间粒径 /mm	不均匀系数	曲率系数
尾矿砂	2.88	0.86	29.9	49				0.058	4.1	1.37
尾矿泥	2.84	0.99	34.9		29.2	23.0	1.92	0.006	11.0	2.30

尾矿料的动强度特性试验根据压力范围分别采用 DSZ 100 型电磁式动三轴仪和 S-3-D 型液压式动三轴仪。经比较试验认为，两台仪器所得到的试验结果，误差在允许的范围之内，可以联合使用。尾矿料的静强度特性试验是在 DTC-158-1 型多功能共振柱三轴仪上进行的。尾矿料静、动三轴试验的原理、方法和资料整理参考《土工试验规程、SL237-1999》进行^[3]。

2 静强度特性

2.1 固结不排水剪三轴试验 研究中采用 4 种围压力：(100、300、500、700) kPa，对尾矿砂和尾矿泥进行了固结不排水剪三轴试验。主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 和轴应变 ϵ_a 以及孔隙水压力 u 和轴应变 ϵ_a 之间的关系见图 1 和图 2。

图 1 (a) 尾矿砂固结不排水 ($\sigma_1 - \sigma_3$) ~ ϵ_a 关系曲线 图 1 (b) 尾矿砂固结不排水 u ~ ϵ_a 关系曲线

图 2 (a) 尾矿泥固结不排水 ($\sigma_1 - \sigma_3$) ~ ϵ_a 关系曲线 图 2 (b) 尾矿泥固结不排水 u ~ ϵ_a 关系曲线

从图 1 可以看出，试验的尾矿砂试样具有剪胀性。开始试样由于剪缩而使孔隙水压力升高，当轴应变 ϵ_a 达到 1.4 % ~ 3 % 时孔隙水压力达到峰值，峰值点的 ϵ_a 值随围压力的增大而增大，然后试样开

始剪胀，孔隙水压力降低，应力 - 应变关系曲线呈现出应变硬化的现象。从图 2 尾矿泥的固结不排水剪试验结果可以看出，尾矿泥试样基本上处于正常压密状态，剪胀性非常微弱。

以有效主应力比的峰值作为破坏点，得出了尾矿砂和尾矿泥的总应力和有效应力抗剪强度指标。所得试验结果列于表 2。从表中可以看出，在试验制备的干密度条件下，它们的总应力抗剪强度指标较低，尤其是尾矿泥，但有效应力抗剪强度指标较高。

表 2 总应力和有效应力抗剪强度指标

土类	干密度 / (g/cm ³)	总应力抗剪强度指标		有效应力抗剪强度指标	
		/ (°)	c/kPa	/ (°)	c/kPa
尾矿砂	1.55	24.0	7.8	36.2	0
尾矿泥	1.43	14.5	8.0	34.5	0

2.2 固结排水剪三轴试验 通常在土石坝和尾矿坝的应力 - 应变有限元计算分析中，大多采用切线弹性模量 E_t 和体积弹性模量 B 来表达土的应力 - 应变关系，称为邓肯等人的 $E_t \sim B$ 模型。本项研究中通过固结排水剪三轴试验，测定了邓肯模型参数值。试验的侧向有效固结应力分别为 (100、200、400、700) kPa。试验结果如图 3 和图 4 所示。本文中给出了邓肯等人 $E_t \sim B$ 模型的参数值，同时，将邓肯-张和库尔哈维等人的 $E_t \sim \mu_t$ 模型参数值也一并汇总于表 3。各参数的计算与意义可参考有关文献*。

表 3 邓肯模型参数值

土类	干密度 / (g/cm ³)	σ_0 / (°)	σ_0 / (°)	R_f	k	n	k_b	m	D	G	F
尾矿砂	1.55	39.2	2.6	0.715	152.0	0.698	115.8	0.418	4.230	0.344	0.126
尾矿泥	1.43	34.5	0	0.573	42.5	1.008	21.3	0.927	2.899	0.244	0.042

图 3 (a) 固结排水 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \sigma_a$ 关系曲线

图 3 (b) 固结排水 $\gamma \sim \sigma_a$ 关系曲线

如图 3 所示，当干密度 $\rho_d = 1.55\text{g/cm}^3$ 时，尾矿砂试样表现出剪胀性的特征。和固结不排水剪试验不同的是，在排水剪试验中该密度的尾矿砂呈脆性破坏，应力 - 应变关系曲线中主应力差出现了峰值，尾矿砂以此峰值所对应的点作为破坏点。从图 4 可以看出，尾矿泥剪胀性很小，对静强度影响微弱，呈塑性破坏。尾矿泥以轴应变 $\epsilon_a = 15\%$ 时应力 - 应变关系曲线中所对应的点作为破坏点。

试验成果表明，尾矿泥的抗剪强度包线随平均有效主应力的变化表现为线形关系，而尾矿砂的抗剪强度却呈现出非线形的特征，抗剪强度包线为一曲线。根据破坏面上的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 和摩尔-库仑强度理论，用下式计算有效内摩擦角：

$$\phi = \sin^{-1} [(\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 + \sigma_3)_f]$$

(1)

* Duncan J M, Byrne P, Wong K S, Mabry P. 用于土体应力 - 应变有限元分析的强度、应力 - 应变和体积弹性模量参数. 林兴常译, 1980 年 8 月。

图 4 (a) 尾矿泥固结排水 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \sigma_a$ 关系曲线 图 4 (b) 尾矿泥固结排水 $v \sim \sigma_a$ 关系曲线

由此,即可整理出 σ_3/P_a 的关系,如图 5 所示。从图中可以看出,尾矿砂的有效内摩擦角 φ 不是一个常数,而是随有效围压力 σ_3 的增大而略有减小。可用下式表示:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/P_a) \quad (2)$$

式中: σ_0 为围压力; σ_3 等于一个大气压时的有效应力内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为内摩擦角随围压力变化的量值; P_a 为标准大气压, σ_3 和 P_a 采用同一量纲。

尾矿砂的抗剪强度呈现出非线形的特征,这一现象主要是由于尾矿砂颗粒在高应力作用下产生剪切破碎所造成的。尾矿砂试样的固结不排水剪试验与固结排水剪试验略有差异,是由于试验条件不同所造成的。因为尾矿泥试样颗粒细,剪胀性非常微弱,因而,在两种试验条件下得出了相同的有效应力抗剪强度指标。

2.3 密度对尾矿砂静力强度和液化特性的影响 试验所用的尾矿泥处于饱和状态,根据饱和含水量与液限含水量对比可知,尾矿泥的试样密度已处于相当疏松的状态,制备干密度已接近于最小值,因而,采用本项研究中给

图 5 尾矿砂 $\varphi \sim \sigma_3/P_a$ 关系曲线

出的尾矿泥的试验结果对于分析尾矿泥地基的稳定性,其结果是偏于安全的。但是,尾矿砂密度的变化范围较大,而进行试验的只是一个干密度,相当于平均值,为了进一步了解密度对尾矿砂应力 - 应变关系和静力强度特性的影响,除了制备干密度为 1.55 g/cm^3 的试验外,又对尾矿砂做了 5 种制备干密度分别为 1.375、1.401、1.426、1.459、1.486 g/cm^3 的饱和固结不排水剪三轴试验,控制有效的围压力 σ_3 为 400kPa,试验结果见图 6。

图 6 (a) 尾矿砂固结不排水 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \sigma_a$ 关系曲线 图 6 (b) 尾矿砂固结不排水 $\mu \sim \sigma_a$ 关系曲线

从图 6 中可以看出,在静力条件下饱和尾矿砂的应力 - 应变关系出现了 3 种状态。当干密度 ρ_d

1.40g/cm³ 时, 达到了完全液化; 当 1.43g/cm³ < ρ_d < 1.46g/cm³ 时, 既出现了塑性屈服阶段, 又产生了应变硬化的现象, 这是有限度的 (或部分的) 液化现象; 当 ρ_d = 1.49g/cm³ 时, 只产生应变硬化的现象, 这是第三种状态——不发生静力液化。

通过对饱和尾矿砂应力 - 应变关系中出现 3 种状态的分析可以认为: 对于本项试验所用的尾矿砂, 只要干密度 ρ_d = 1.49g/cm³, 尾矿砂就不会发生静力液化。除了尾矿砂的强度值会有所变化外, 其静力强度特性不会发生质的变化。但是, 当干密度在 1.49g/cm³ 和 1.40g/cm³ 之间变化时, 饱和尾矿砂的静强度随干密度的减小而急剧减小, 当干密度 ρ_d = 1.40g/cm³ 时, 即使在静力条件下, 饱和尾矿砂也会呈现出流动状态, 产生完全液化。由以上的分析还可以发现, 从不会发生静力液化到完全液化, 其干密度的变化范围是非常小的。为了保证工程的安全, 对于尾矿料的这种特殊性质, 在尾矿坝设计和废弃尾矿库的开发利用中必须给予足够的认识和重视。

3 动强度特性

为了对尾矿料的抗震稳定性作出评价, 通过动三轴试验测定了尾矿砂和尾矿泥的动强度特性。控制的应力条件为: 固结比 K_c = 1 时, 有效围压力 σ_3 为 (100、200、500、900) kPa; 固结比 K_c = 2 时, 有效围压力 σ_3 为 (100、200、500、700) kPa。试验结果如图 7 至图 10 所示。由于试验中 K_c = 1 时, 初始液化和轴向动应变幅 ϵ_a = 5 % 几乎同时发生, 它们的动剪应力比 τ/σ_0 与循环周数 N 的关系曲线基本重合, 本项研究中采用 ϵ_a = 5 % 作为破坏标准。应变反向时取双幅, 应变不反向时取弹性应变与塑性应变之和。

图 7 和图 8 分别给出了尾矿砂和尾矿泥动剪应力比 (或称动剪强度比) τ/σ_0 与循环周数 N 的关系曲线, τ 为动三轴试验中试样 45° 面上的动剪应力幅, σ_0 = $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 为试样 45° 面上的初始有效法向应力。

图 7 $\tau/\sigma_0 - N_f$ 关系曲线

图 8 $\tau/\sigma_0 - N_f$ 关系曲线

从图 7 和图 8 可以看出, 在等压固结 K_c = 1 和 N_f = 12 周时, 无论是尾矿砂还是尾矿泥, 它们的动强度较低, 动剪应力比 τ/σ_0 都没有超过 0.18, 而且动剪应力比 τ/σ_0 的变化范围很小, 一般在 0.1 ~ 0.2 之间。

以潜在破坏面上的初始剪应力比 τ_0/σ_0 为参数, 整理出了地震震级为 7 级时潜在破坏面上地震总应力抗剪强度 τ_s 与初始有效法向应力 σ_0 的关系, 见图 9 和图 10。有关原理、整理方法及相应的换算公式可参考有关文献^[4], 其中, τ_0 为潜在破坏面上的初始剪应力比 τ_0/σ_0 , N_f 为达到破坏时的等效循环周数。根据西特 (Seed, H. B.) 的研究成果^[5], 相当于 7 级地震时的等效循环周数取 12 周。

从图 9 和图 10 中可以看出, 在等压固结 σ_3/σ_1 = 0 和 N_f = 12 周时, 尾矿砂和尾矿泥的地震总应力抗剪强度 τ_s 都随初始有效法向应力 σ_0 的增加而呈线形增加, 但是, 增加的数值非常有限。地震总应力抗剪强度指标内摩擦角 ϕ 较小, 都在 10° 以内。在偏压固结 σ_3/σ_1 = 0.34 和 N_f = 12 周时, 尾矿砂和尾矿

泥却表现出了不同的动强度特性。尾矿泥的地震总应力抗剪强度 f_s 与初始有效法向应力 σ_0 之间仍为线形关系，而尾矿砂却表现出了非线性的特征，随着 σ_0 的增大， f_s 增大的速率逐渐减小。本项研究中对尾矿砂的非线性地震总应力抗剪强度曲线按分段线性考虑。根据试验结果分为 3 段，分别求出各段的地震总应力抗剪强度参数。为了便于在抗震稳定分析中使用，地震总应力抗剪强度可用下式计算：

$$f_s = (f_{s0}) + \tan \varphi_d \cdot \sigma_0 \tag{3}$$

式中： (f_{s0}) 和 φ_d 分别是潜在破坏面上的初始剪应力比为 0 时地震总应力抗剪强度指标凝聚力和内摩擦角。

假设 (f_{s0}) 和 $\tan \varphi_d$ 与 σ_0 之间均可近似取为直线关系，其表达式可以写为

$$(f_{s0}) = f_{s0} + \dots \tag{4}$$

$$\tan \varphi_d = \tan \varphi_{d0} + \dots \tag{5}$$

式中： f_{s0} 和 φ_{d0} 分别是 $\sigma_0 = 0$ 时的地震总应力抗剪强度指标凝聚力和内摩擦角； \dots 与 \dots 为比例系数。 f_{s0} 、 φ_{d0} 、 \dots 与 \dots 均由试验结果确定。 $\sigma_0 > 0.34$ 时可以适当外插，但 φ_d 不应超过静力有效强度的内摩擦角。本项试验研究中所用尾矿料的有关参数列于表 4 供参考。

图 9 $f_s - \sigma_0$ 关系曲线

图 10 $f_s - \sigma_0$ 关系曲线

表 4 饱和尾矿料地震总应力抗剪强度参数 (N = 12 周)

土类	tg φ_d	σ_0 /kPa		/kPa	f_{s0} /kPa
尾矿砂	0.082	0 ~ 2.4 E^2	1.66	0	0
		(2.4 ~ 6.0) E^2	1.33	0.74 E^2	
		(6.0 ~ 8.4) E^2	1.15	1.76 E^2	
尾矿泥	0.081	(0 ~ 8.4) E^2	1.22	0	0

4 结论

(1) 等压固结潜在破坏面上的初始剪应力比 $\sigma_0 = 0$ 和破坏周数 $N_f = 12$ 周（相当于 7 级地震时的等效循环周数）时，在不同的围压力条件下，无论是尾矿砂还是尾矿泥，它们的动强度都比较低，两者的动剪应力比 τ/σ_0 一般不超过 0.18，而且动剪应力比 τ/σ_0 的变化范围很小，大约在 0.1 ~ 0.2 之间。(2) 等压固结 $\sigma_0 = 0$ 和 $N_f = 12$ 周时，尾矿砂和尾矿泥的地震总应力抗剪强度 f_s 都随初始有效法向应力 σ_0 的增加而呈线形增加，但是，增加的数值非常有限。同时，它们的地震总应力抗剪强度指标内摩擦角 φ_d 较小。本项研究中的尾矿砂和尾矿泥，它们的内摩擦角 φ_d 一般大约在 10° 以内。(3) 偏压固结 $\sigma_0 = 0.34$ 和 $N_f = 12$ 周时，尾矿砂和尾矿泥表现出了不同的动强度特性。尾矿泥的地震总应力抗剪强度 f_s 与初始有效法向应力 σ_0 之间仍为线性关系，而尾矿砂却表现出了非线性的特征，随着 σ_0 的增大， f_s 增大的速率逐渐减小。(4) 当 $0 < \sigma_0 < 0.34$ 时，地震总应力抗剪强度 f_s 可用近似表达式 (3)、(4)、(5) 进行计算。 $\sigma_0 > 0.34$ 时可以适当外插，但 φ_d 不应超过静力有效强度的内摩擦角。(5)

尾矿泥的细颗粒中黏土矿物颗粒含量较少，石英含量较多，矿物成分具有尾矿砂的特点。它的颗粒细，密度小，剪胀性非常微弱。处于流塑状态的尾矿泥，其静、动力强度都较低。另外，它的细颗粒亲水性很弱，极易形成流动破坏的条件。虽然尾矿泥的颗粒中小于 0.005mm 的粒径含量高达 39%，但是，它的饱和含水量超过液限，液性指数大，塑性指数小，属于可液化的尾粉土。天然地基少黏性土层判别液化可能性的标准对于用尾矿泥充填的地基土层是不适用的。(6) 密度对尾矿砂的应力 - 应变关系和静强度特性影响显著。对于本项研究中所用的铁矿尾矿砂，只要干密度 $\rho_d = 1.49\text{g/cm}^3$ ，饱和尾矿砂就不会发生静力液化。除了尾矿砂的强度值会有所变化外，其静力强度特性不会发生质的变化。但是，当干密度在 1.49g/cm^3 和 1.40g/cm^3 之间变化时，饱和尾矿砂的静强度会随干密度的减小而急剧减小，当干密度 $\rho_d = 1.40\text{g/cm}^3$ 时，即使在静力条件下，饱和尾矿砂也会呈现出流动状态，产生完全液化。(7) 饱和尾矿砂从不会发生静力液化到有限度的液化，并且进一步呈现出流动状态，产生完全液化，其干密度的变化范围是非常小的。饱和尾矿料具有敏感的不稳定结构，现场的密度分布、矿物成分和颗粒组成等都是非常可变的。为了保证工程的安全，对于尾矿料的这些静、动力特殊性质，在尾矿坝设计和废弃尾矿库的开发利用中必须给予足够的认识和格外重视，必要时应考虑采用综合工程措施，以确保尾矿料沉积体的稳定。

参 考 文 献:

- [1] Finn, W D L. Scismic Stability of Tailings Dams [A]. General Reporter Department of Civil Engineering University of British Columbia Vancouver, B. C., Canada, Proc. International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams [C]. ICOLD, Sydney, Australia, May 23, 1990.
- [2] 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, 1990.
- [3] SL237-1999, 土工试验规程 [S].
- [4] 汪闻韶. 在某电厂地基饱和砂性土地震稳定性试验中提出的原理和方法 [A]. 水利水电科学研究院科学论文集 [C]. 第 16 集, 北京: 水利电力出版社, 1984 年 1 月.
- [5] Seed H B, Idriss I M, Makdis F I, Banerjee N. Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses [R]. Report No. EERC 75-29, EERC Univ. of California, Berkeley, Calif. Oct., 1975.

Experimental study on static and dynamic strength properties of saturated tailings

RUAN Yuan-cheng¹, GUO Xin²

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

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

Abstract: Experimental study on static and dynamic strength properties of two kinds of saturated tailings is carried out. The result shows that owing to the effects of the grain and mineral composition et al., the characteristics of foundation filled with tailings possesses the specialty other than that of natural soil. The grain of tailings is finer with larger specific density, its content of quartz is more and water affinity is weak. The saturated loose tailings has a sensitive unstable structure which not only results in lower dynamic shear stress ratio with a narrower variable range under cyclic loading and leads to liquefaction of flow failure, but also gives rise to flow failure even under static loading if the density of the tailings is smaller than a critical value.

Key words: tailings; static and dynamic strength properties; mineral composition; liquefaction; flow failure