

尾矿砂动力特性的动三轴试验研究

常礼安¹, 张吉宏^{1,2}, 彭湘林²

(1. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司; 2. 陕西省尾矿库防灾减灾工程技术研究中心)

摘要:尾矿库是堆存选矿后尾矿的场所,尾矿砂主要为细砂、粉砂等无黏性土,往往处于饱和状态,因此在地震作用下易发生液化并造成尾矿坝的失稳破坏。以某尾矿库为研究对象,通过现场勘察取样,对 4 种类型尾矿砂即尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的特征进行了描述和物理参数测试。采用 STX-200 液压伺服式动三轴试验仪对尾矿砂试样动弹性模量、动剪切模量和阻尼比等动力学参数进行了试验测试。结果表明:试样的初始动弹性模量和初始动剪切模量均随动应变的增大先减小后趋于稳定,且受试样固结围压影响很大;随着动应变的增大,试样最大阻尼比呈明显的非线性增大,即先迅速增大后缓慢增大并趋于平稳,但其受围压的影响较小。试验结果可为尾矿库在地震作用下的动力液化分析提供数据支持。

关键词:尾矿砂;液化;动三轴试验;滞回曲线;动力学参数

中图分类号:TD926

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)07-0094-08

doi:10.11792/hj20240716

引言

目前,中国有近万座尾矿库,在用的约占 1/3,环境风险相对高的约占 1/3。总体来说,中国尾矿库数量多、风险高,一旦失事,会造成较大的生命财产损失和生态环境破坏^[1]。RICO 等^[2]研究表明,尾矿库失事一般由自然和人为因素共同造成,其中地震影响十分显著,占第 2 位,而中国很多尾矿库也位于地震区^[3]。同时,由于尾矿库内通常存储有大量选矿废水,因此由渗流及地震作用引起砂土液化而导致的溃坝事故屡见不鲜。LYU 等^[4]基于对全球近 100 年尾矿库事故的统计发现,造成尾矿库溃坝的主要原因可归为 5 种,即坝体渗透破坏、坝体地基失稳、洪水溢流、强震及其他原因。郭廷亨等^[5]通过对近 20 年典型尾矿库事故统计发现,诱发尾矿库事故的原因主要为坝体渗透破坏、洪水溢流、坝体滑动和地震破坏等 4 种,占比分别为 50.72%、34.78%、8.70% 和 5.80%,可以看出 50% 以上的尾矿库事故均源自坝体渗透破坏^[6]。这是由于尾矿砂主要为细砂、粉砂等无黏性土,同时尾矿库中通常储存大量选矿废水(循环利用),因此尾矿砂常处于饱和状态,在地震等动力作用下很容易产生液化,进而发生溃坝事故。因此,开展地震作用下饱和尾矿砂的动力特性及液化机理研究具有重要的意义。

地震作用下尾矿砂液化研究主要采用动力时程

法^[7-8],而尾矿砂的动力学参数如动剪切模量、阻尼比等对计算结果影响至关重要。因此,对尾矿砂动力特性参数的试验测试成为进行地震作用下尾矿砂液化研究的前提和基础。很多学者采用动三轴试验对尾矿砂动力特性进行了深入研究。陈敬松等^[9]基于动三轴试验研究了循环加载条件下饱和尾矿砂的液化性能及动强度特性,结果表明,试件轴向动应变受动应力幅值影响十分显著,认为尾矿砂密度对其抗液化性能影响很大,可通过提高其密实度来降低尾矿砂发生液化的几率。张超等^[10]采用动三轴和共振柱试验研究了某铜矿尾矿砂的动力变形特性,提出了便于工程应用的孔隙水压力计算模型及公式。同时,发现在液化振次相同的条件下,随着围压的升高,其动应力比随之降低。尾矿砂阻尼比和动剪切模量随动应变幅值的增大分别增大和减小。张向东等^[11]采用动三轴试验对尾矿砂在动载下的动强度及液化性能进行了深入研究,发现动强度随着固结比与围压的增加而增加,抗剪强度也随埋深的增加而增加。孙从露等^[12]通过动三轴试验研究了动载振动频率和砂土固结状态对尾矿砂动强度及孔压上升的影响规律,发现尾矿砂的液化强度随振动频率的降低而提高。刘潇等^[13]通过动三轴试验研究了围压和饱和度对尾粉砂动强度的影响规律,提出了一种更加符合实际的孔压应力模型。杜艳强等^[14]采用 GDS 动三轴循环试验,研究了尾粉土的相对密度及固结围压对其孔隙水压力分布特征的影响规律。结

果显示,循环动荷载下尾粉土的孔隙水压力与砂土显著不同,其孔隙水压力增长规律可用双 S 型模型进行描述。杨东旭等^[15]基于动三轴试验对尾矿砂的动力特性进行了深入研究,分析了围压及动载振次对土样破坏特征的影响,获得了相应的应力、应变与动载振次的关系曲线。结果表明,尾矿砂的动强度随动载振次的增加而降低,但随着围压的增加而大幅增加。陈志斌等^[16]采用动三轴试验研究了不同固结压力和层状结构条件下尾矿砂动弹性模量、阻尼比及动应力随动孔压的变化规律。

由上述研究可以看出,尾矿砂动力特性参数对尾矿坝液化稳定性计算至关重要。然而,由于矿物组成、选矿工艺等不同,导致不同尾矿砂的物理力学性质不同,需针对具体尾矿砂的性质及沉积条件等开展动三轴试验以测试其动力参数,进而为地震作用下尾矿砂液化稳定性分析提供可靠的基础参数。本研究以某山谷型尾矿库为例,通过现场取样对尾矿砂的动力学参数进行测试,研究结果为该尾矿库地震液化稳定性分析提供计算参数。

1 尾矿库土层分布

本研究所用尾矿砂取自于某山谷型尾矿库,为评价该尾矿砂在地震等动力作用下的液化性能,需要对其动力学特性进行分析。首先,对该尾矿库进行工程勘察,通过钻探取样获取尾矿砂试样,而后进行动三轴试验以测试其动力学参数,供动力液化分析使用。本次现场勘察中对尾矿砂及地基土的分类参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》和 GB 50547—2010《尾矿堆积坝岩土工程技术规范》。根据 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》,并基于现场原位试验、室内土工试验等测试结果,该尾矿库土层自天然地表向下主要有尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土,覆盖层下面为全风化—中等风化片麻岩,各土层主要特征如下:①尾中砂。颜色呈灰色,密实度为稍密—中密,含水状态为稍湿,颗粒级配程度良好,土体结构分选性差,外表多呈近圆形,矿物组成主要为长石、石英、云母等,偶见粗颗粒。②尾细砂。颜色呈灰色,密实度为中密—密实,含水状态为稍湿,颗粒级配程度良好,土体结构分选性差,外表都呈近圆形,矿物组成主要为长石、石英、云母等。③尾粉砂。颜色为灰色,密实度为中密—密实,含水率较高;均匀性差,具有微层理结构;对振动较为敏感,无光泽,强度及韧性均较低;可压缩性为中等。④尾粉质黏土。颜色呈灰色,密实度为中密—密实,含水状态为湿;土质相对均匀,基本无层理,主要分布于尾粉砂层底部,厚度不均,层底标高不稳定。太古代片麻岩根据风化程度不

同分为 3 层:①全风化片麻岩。颜色呈棕红色,密实度为密实,已风化成土状、砂粒状,强度高,含砂砾、角砾等。②强风化片麻岩。颜色呈黄色,强度较高,变晶结构,片麻状构造,碎粒状—碎块状,手易捏碎;岩芯采取率约 60%, $RQD=0$ 。③中等风化片麻岩。颜色呈灰色,强度较高,变晶结构,块状构造,呈块状;岩芯为短柱状,长度 6~20 cm,采取率 85%, $RQD=20\% \sim 35\%$ 。各土层的基本物理参数(平均值)如表 1 所示。

表 1 各土层的基本物理参数(平均值)
Table 1 Basic physical parameters of each soil layer
(average value)

指标	尾中砂	尾细砂	尾粉砂	尾粉质黏土
含水率/%	4.58	11.76	23.85	9.20
相对密度	2.72	2.62	2.49	1.72
密度/(g·cm ⁻³)	1.79	1.90	2.06	2.19
干密度/(g·cm ⁻³)	1.69	1.74	1.66	2.10
孔隙比	0.63	0.60	0.58	0.30
饱和度/%	29.36	39.23	100.00	42.66
液限/%				30.87
塑限/%				15.47
塑性指数/%				15.40
液性指数				0.12

2 试验部分

2.1 试验仪器

试验仪器采用美国 GCTS 公司生产的 STX-200 液压伺服式动三轴试验仪(如图 1 所示),包括液压站及空压机、数字信号调控器、压力/体积控制器、压力室及荷载支架、CATS 电脑操控软件。主要技术指标为:振动频率 0~20 Hz,位移速率 100 mm/s,轴向最大位移 50 mm,轴向最大荷载 22 kN,最大孔压 1 MPa。该仪器试验过程中具有一定的自我保护功能,并且配备强制停止按钮。当试验过程中有操作不当或者操作错误时,系统有警告提示,甚至直接终止工作。当遇见突发情况时,也可以直接按下强制停止按钮,保证试验仪器及人员安全。

2.2 试验原理及试验方案

动三轴试验是在压力室内通过轴向加载杆和水压对圆柱形试样同时施加垂直压力 σ_1 和径向压力 σ_3 ,先对试样施加一定围压(通常固结比 $K_c=1$),然后对试样施加垂直动荷载 $\pm \sigma_d$;或者对于非饱和状态试样不进行固结,试样在一定应力状态下稳定后直接施加动荷载 $\pm \sigma_d$ 进行振动。在对试样施加径向压力 σ_3 稳定后,施加动荷载前,试样 $\pi/2$ 斜面上的法向应力亦为 σ_3 ,相应的剪应力 τ 则为 0。当对试样轴

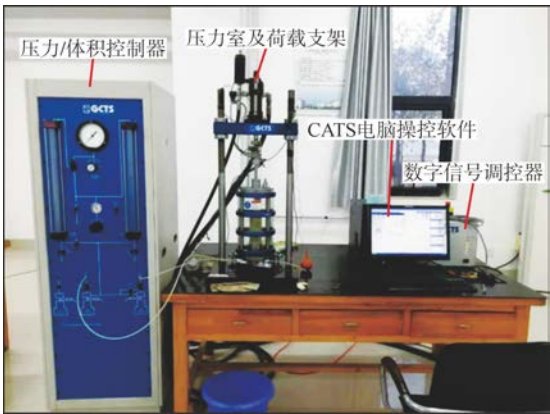


图1 STX-200 液压伺服式动三轴试验仪
Fig.1 STX-200 hydraulic servo dynamic triaxial apparatus

向施加动荷载 $\pm \sigma_d$ 后,试样 $\pi/2$ 斜面上的应力状态发生了改变,产生相应的动应力 $\tau_d = \pm \sigma_d/2$,法向压力相应地变为 $\sigma_3 \pm \sigma_d/2$ 。试样在振动过程中的应力状态如图2所示。

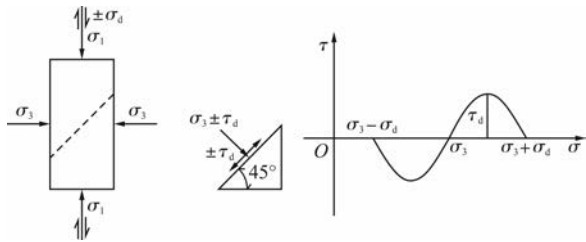


图2 试样在单向动荷载下的应力状态
Fig.2 Stress status of test sample under one-way dynamic loading

动剪切模量及阻尼比是评价土体动力学特征的重要参数,对地震安全评价和地震反应计算分析起着关键作用。动弹性模量 E_d 是指滞回圈的平均斜率,即:

$$E_d = \sigma_d / \varepsilon_d \tag{1}$$

式中: ε_d 为轴向动应变。

而动剪切模量 G_d 和动应变 γ_d 的关系式为:

$$G_d = E_d / [2(1 + \mu)] \tag{2}$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d (1 + \mu) \tag{3}$$

式中: μ 为泊松比。

在动三轴试验过程中,通常把承受动荷载作用的土样视为黏弹性体,振动过程中试样变形存在一定阻尼。因此,循环振动过程中试样的动应变将稍滞后于所施加的动应力。土体在动荷载下的动应力-动应变关系往往具有滞后性、非线性和累积性等特性。当在土体上施加循环周期动荷载,施加的动应力较小时,试样没有明显的变形破坏,此时可得到如图3所示的曲线,即一个加载-卸载-再加载循环内的动应力-动应变关系曲线,形成一个滞回圈,亦称为滞回曲线,其特点是以坐标原点为中心、呈封闭状态且上下基本对称。A、A'两点连线的斜率即为试样在该循

环动应力状态下的动弹性模量 $E_{d0} = \sigma_{d0} / \varepsilon_{d0}$ 。对于理想黏弹性体,当动应力幅值相同时,滞回圈的形状和大小不会随振次的增加而变化。在土体动三轴试验中,逐级增加动荷载的振幅,此时动应力幅值增大,可绘制出动应力增大后的滞回曲线。与小幅值状态下动应力滞回曲线相比,大幅值状态下动应力滞回曲线上、下两个峰值点连线的斜率会逐渐减小,即土体的动弹性模量降低,且强度也随之逐渐降低。

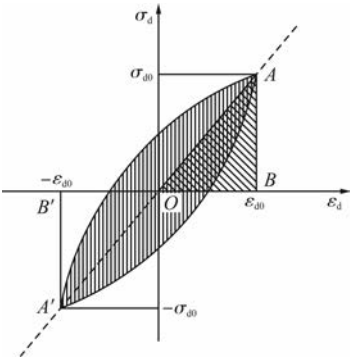


图3 动应力-动应变滞回曲线
Fig.3 Dynamic stress - dynamic strain hysteresis curve

得到滞回曲线后,可利用式(4)计算尾矿砂的阻尼比(D):

$$D = \frac{W_D}{4W_s} \tag{4}$$

式中: W_D 为滞回圈面积 (m^2); W_s 为 $\triangle AOB$ 面积 (m^2)。

本次动三轴试验尾矿取自某尾矿库现场,将其重塑制备成高100 mm、直径50 mm的圆柱形,如图4所示,包括尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土4种。试样根据室内土工试验结果中的干密度和含水率梯度设计,其制备要求及试验工况如表2所示,试验加载波形为正弦波。

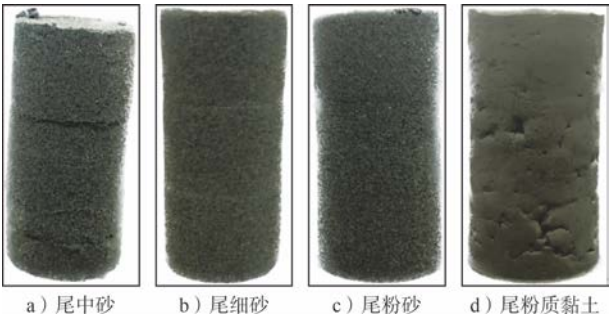


图4 4种尾矿砂试样
Fig.4 4 kinds of tailings sand test samples

3 试验结果与分析

尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土动三轴试验结果如图5~8和表3所示,并对试验结果从不同角度进行分析。

表 2 试样制备要求及动三轴试验工况

Table 2 Test sample preparation requirement and dynamic triaxial test settings

试样	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	取样深度/m	围压/kPa	振动频率/Hz	振幅
尾中砂	1.79	14.2	4.0~4.2	100/200/300	1	逐级递增
尾细砂	1.67	15.3	2.0~2.2	100/200/300	1	
尾粉砂	1.56	16.5	3.5~3.7	100/200/300	1	
尾粉质黏土	1.34	32.0	24.0~24.2	100/200/300	1	

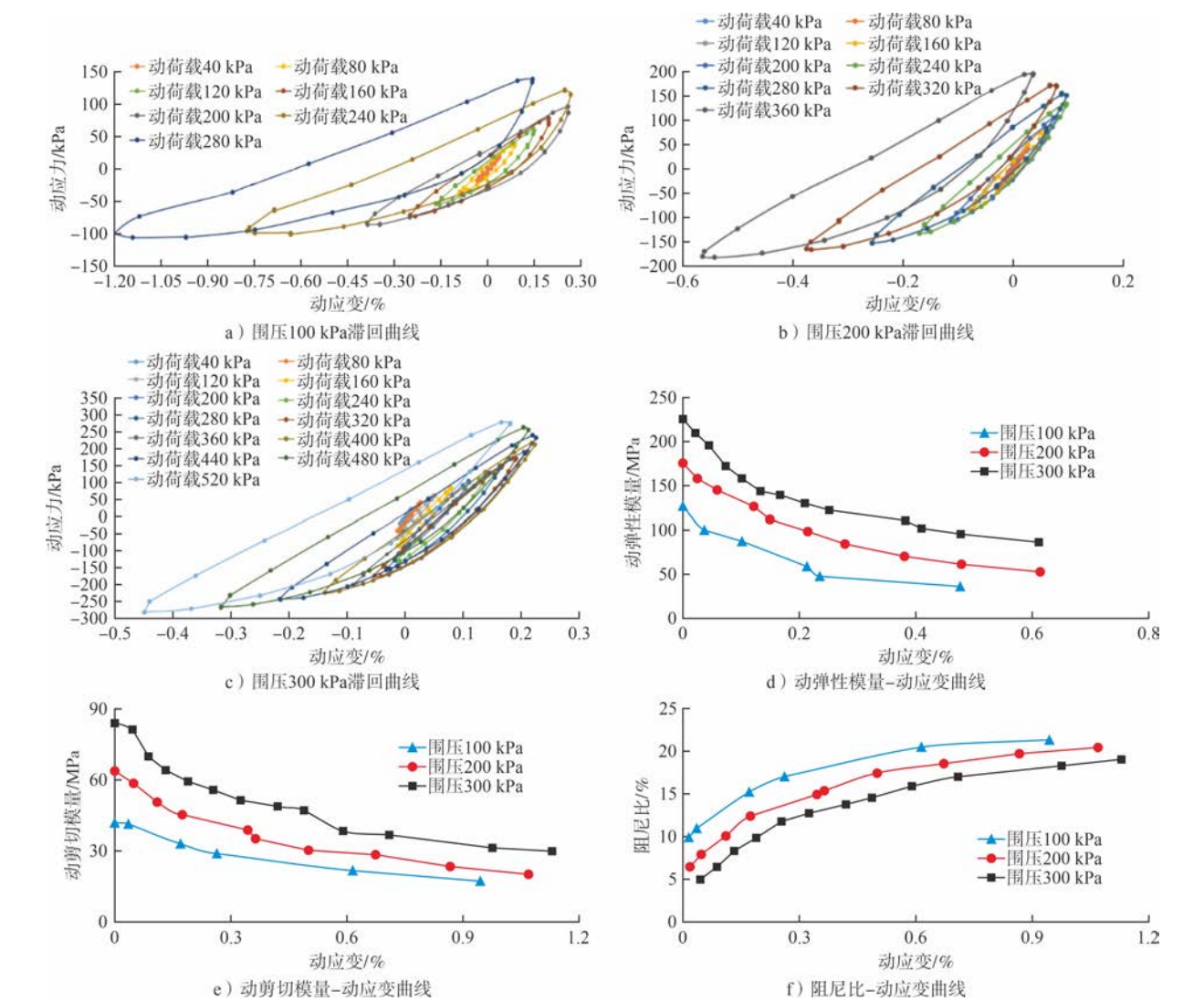


图 5 不同围压下尾中砂动三轴试验结果

Fig. 5 Results of the tailings middling sand with dynamic triaxial test under different confining pressure

1) 滞回曲线。随着动荷载的增加,滞回曲线的形状及面积均随之逐渐增大^[17],相应地曲线上最大动应变与原点连线的斜率也随之增大。滞回曲线面积代表一个动荷载循环周期内所消耗的能量,可以看出随着动荷载的增加,尾矿砂所消耗的能量是逐渐增加的,而土体内部吸收的能量则是逐渐减小的。这是由于随着动荷载的增加,尾矿砂将由最初的弹性变形逐渐过渡到弹塑性变形,甚至完全塑性变形。因而动荷载作用产生的能量越来越多地用于尾矿砂的塑性

变形。①从滞回曲线的形状及面积来看,以图 5-a) 为例,当动荷载由 40 kPa 逐渐增加到 280 kPa 时,滞回曲线面积分别为 40 kPa 时的 7.32 倍、24.74 倍、47.23 倍、101.59 倍、202.08 倍和 283.99 倍,即随动荷载的增加,滞回曲线面积显著增加;当动荷载增加到一定程度时,尾矿砂将发生显著的塑性变形。②从滞回曲线的位置来看,随着动荷载的增加,滞回曲线将逐渐向 x 轴负方向偏移,滞回曲线的中心位置逐渐向动应变绝对值增大的方向移动,即负的动应变越来越

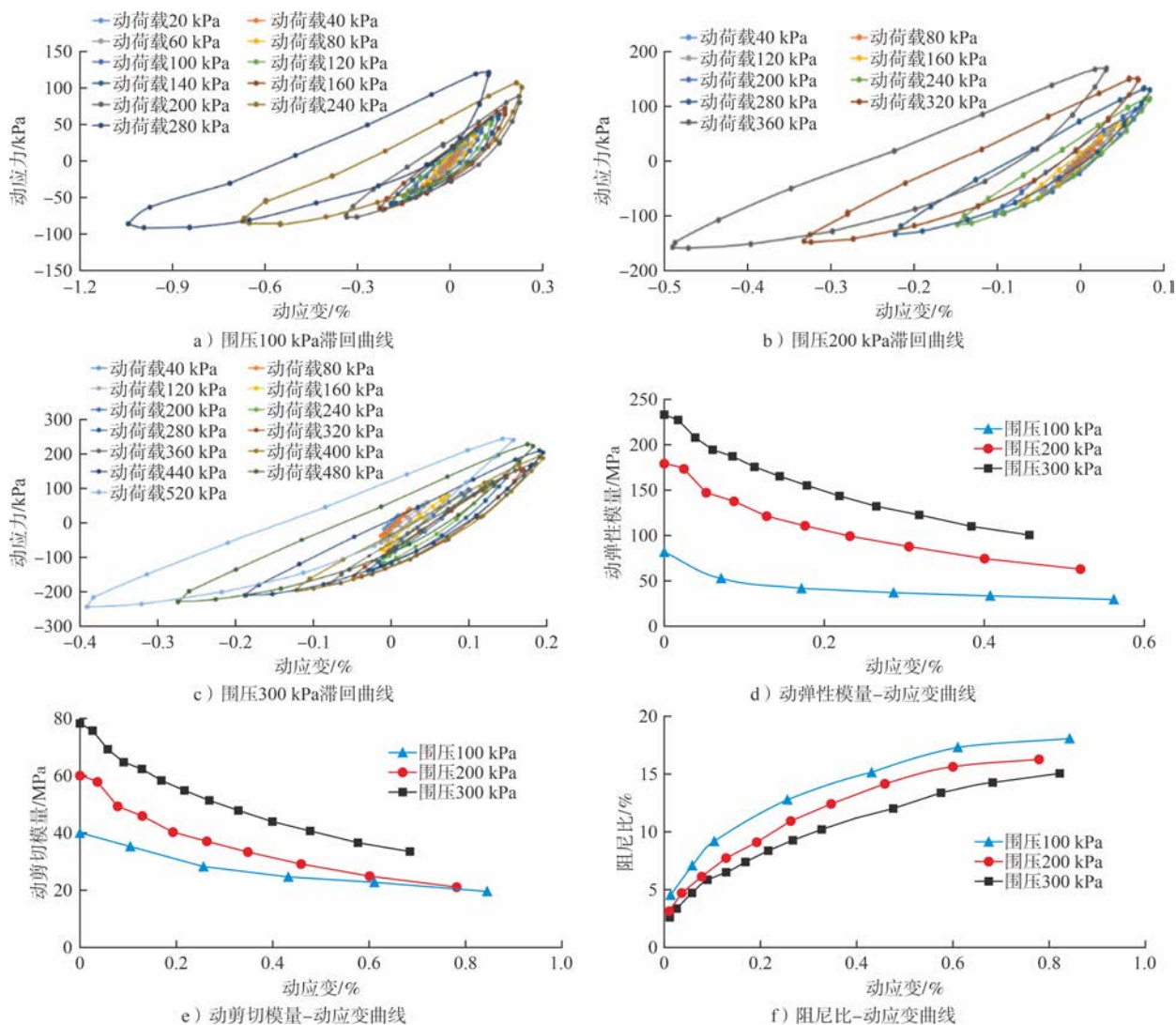


图6 不同围压下尾细砂动三轴试验结果

Fig.6 Results of the tailing fine sand with dynamic triaxial test under different confining pressure

越大。随振次的增加,尾矿砂的负动应变将逐渐大于正动应变,即逐渐出现明显的剪胀现象。分析认为,这是由于随着动荷载的持续加载,尾矿砂的液化效应逐渐显著,且其变形状态也将由弹性变形逐渐过渡到弹塑性变形,直至完全塑性变形,从而导致在一个循环加载周期内,尾矿砂的剪胀变形大于其剪缩变形,出现显著的体积膨胀现象。③从不同类型的尾矿砂滞回曲线来看,当尾矿砂类型不同时,滞回曲线也有所不同。尾中砂、尾细砂和尾粉砂等3种尾矿砂的滞回曲线总体上类似,即均呈类椭圆状且随着动荷载的增加,其逐渐向 x 轴负向移动,呈现明显的剪胀现象。尾粉质黏土的滞回曲线明显与上述3种尾矿砂的滞回曲线不同,其形状更偏向于“口”字形,且随动荷载的增加,长度越长,高度越低。同时,滞回曲线整体逐渐向 x 轴正方向偏移。这说明随着动荷载的增加,尾粉质黏土逐渐出现明显的剪缩现象,这也是黏性土区别于砂性土的一个重要特征。

2) 动弹性模量。动弹性模量是指使物体产生弹性应变所需要的应力,是衡量物体刚度的重要指标。在土体的骨干曲线上,每点割线模量的大小被称为土体的动弹性模量。将试验得到的数据点进行拟合,数据点基本落在拟合直线上,拟合效果较好。因此,100 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的初始动弹性模量分别为 126.58 MPa、81.96 MPa、92.59 MPa 和 84.75 MPa;200 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的初始动弹性模量分别为 175.44 MPa、178.57 MPa、169.49 MPa 和 125.00 MPa;300 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的初始动弹性模量分别达到 226.33 MPa、232.56 MPa、222.22 MPa 和 217.39 MPa。对同一种尾矿砂,围压越大,初始动弹性模量越大;随着动应变的增大,4 种尾矿砂的动弹性模量均减小,但减小速度不同,在动应变小于 0.1 % 时,动弹性模量减小最快;同一种尾矿砂在动应变大于 0.1 % 时,围压越大,动弹性模量减

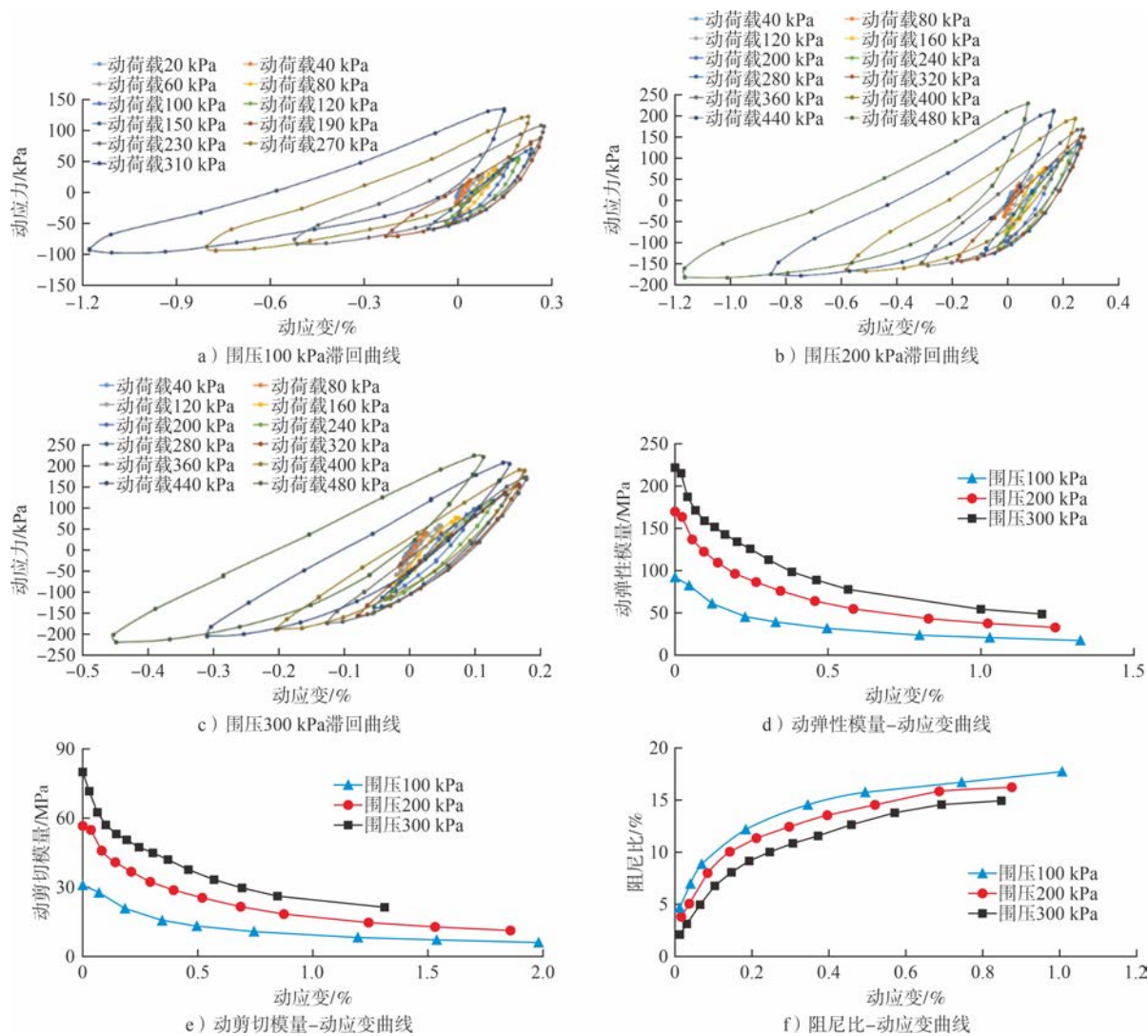


图 7 不同围压下尾粉砂动三轴试验结果

Fig. 7 Results of the tailings silt with dynamic triaxial test under different confining pressure

小越快;而同一尾矿砂、同一动应变条件下,围压越大,动弹性模量越大。

3) 动剪切模量。根据动三轴试验结果绘制的动应力-动应变滞回曲线,计算得到动剪切模量与动应变的关系曲线。发现随着动应变的增大,动剪切模量逐渐降低。100 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的初始动剪切模量分别为 41.91 MPa、39.79 MPa、30.77 MPa 和 28.49 MPa;200 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的初始动剪切模量分别为 63.74 MPa、59.88 MPa、56.50 MPa 和 42.55 MPa;300 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的初始动剪切模量分别为 84.06 MPa、78.13 MPa、80.00 MPa 和 72.46 MPa。由于围压增加,土体颗粒之间结合更加密实,使得尾矿砂动强度增加,且初始动剪切模量与所施加的围压呈显著的正向关系。随着围压的逐渐增加,尾矿砂也逐渐由弹性变形过渡到弹塑性变形甚至塑性变形,相应地动剪切模量也逐渐增大。在开始阶段,土体处于

弹性阶段,其变形属于小变形;而后随着围压的持续增加,尾矿砂动剪切模量逐渐增大,当变形达到一定程度时,尾矿砂开始出现破坏,进而出现不可恢复的变形。

4) 阻尼比。尾矿砂阻尼比反映其在变形过程中由于摩擦等能量耗散的特性,即尾矿砂在动荷载下的能量损失特性。尾矿砂的能量损失特性与其所处变形状态密切相关,当动应变较小时,尾矿砂处于弹性状态,动应力较小,阻尼比很小,甚至可以忽略不计。随着动应变的不断增大,尾矿砂将逐渐发生弹塑性变形,此时由于摩擦等原因,其消耗的能量也随之增加,进而阻尼比明显增大。由 H-D 模型^[18]和试验得到的动应力-动应变滞回曲线,可以计算出尾矿砂的阻尼比与动应变曲线。100 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的最大阻尼比分别为 21.32 %、18.12 %、17.75 % 和 37.15 %;200 kPa 围压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的最大阻尼比为 20.41 %、16.32 %、16.25 % 和 34.56 %;300 kPa 围

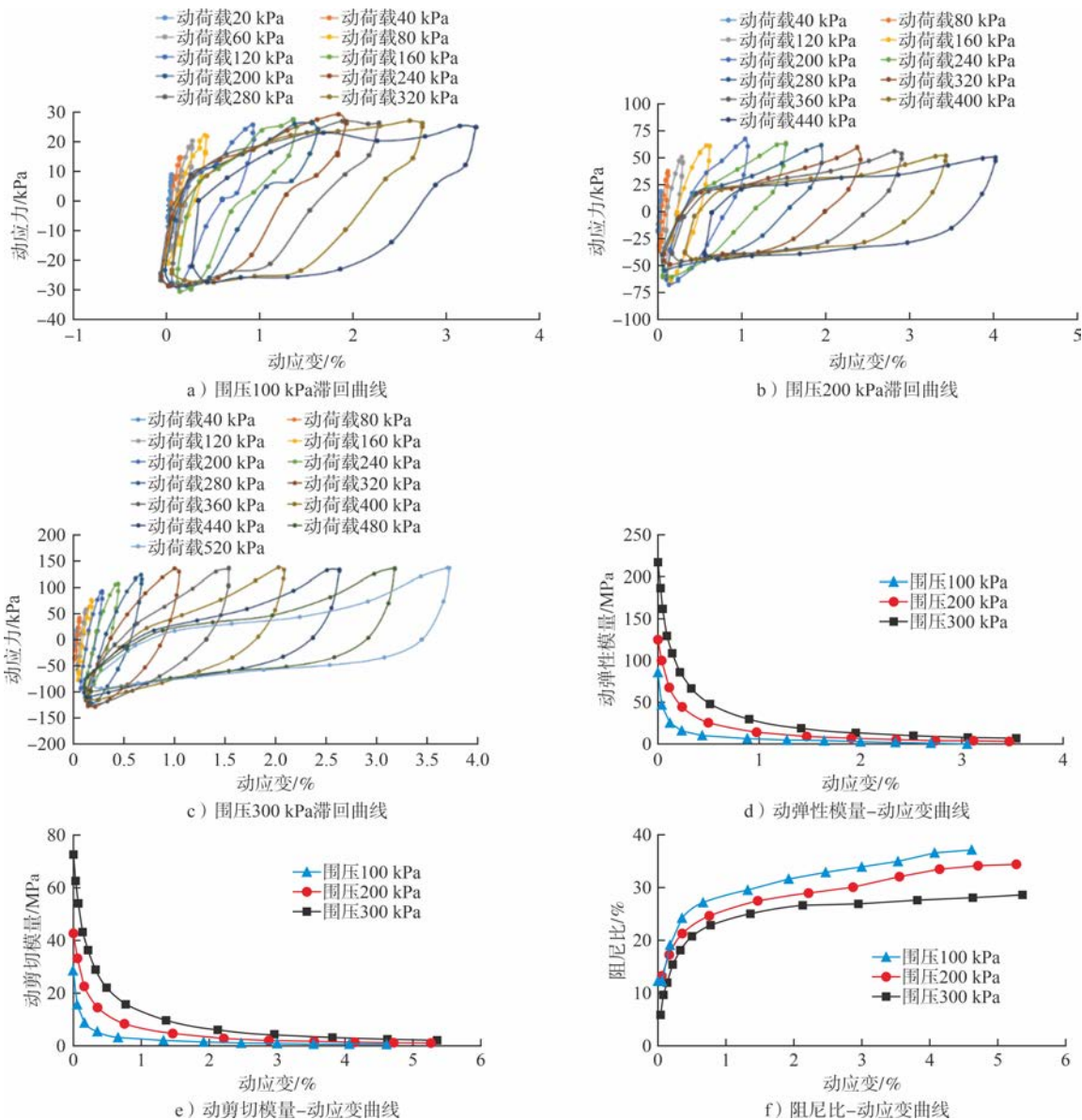


图 8 不同围压下尾粉质黏土动三轴试验结果

Fig. 8 Results of the tailings silty clay with dynamic triaxial test under different confining pressure

表 3 尾矿砂动三轴试验结果

Table 3 Results of the tailing sand with dynamic triaxial test

试样	围压 100 kPa			围压 200 kPa			围压 300 kPa		
	初始动弹性模量/MPa	初始动剪切模量/MPa	最大阻尼比/%	初始动弹性模量/MPa	初始动剪切模量/MPa	最大阻尼比/%	初始动弹性模量/MPa	初始动剪切模量/MPa	最大阻尼比/%
尾中砂	126.58	41.91	21.32	175.44	63.74	20.41	226.33	84.06	19.01
尾细砂	81.96	39.79	18.12	178.57	59.88	16.32	232.56	78.13	15.11
尾粉砂	92.59	30.77	17.75	169.49	56.50	16.25	222.22	80.00	14.93
尾粉质黏土	84.75	28.49	37.15	125.00	42.55	34.56	217.39	72.46	28.69

压下尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质黏土的最大阻尼比分别为19.01 %、15.11 %、14.93 %和28.69 %。这表明,尾矿砂阻尼比与围压、尾矿砂类型等均有很大关系。此外,虽然尾矿砂阻尼比随动应变的增加呈现先迅速增加后逐渐稳定的趋势,但尾矿砂种类不同,

趋势有所不同。对于尾中砂,在动应变低于0.3 %时,阻尼比随动应变的增加而迅速增加,而后逐渐趋于稳定;对于尾粉质黏土,在动应变低于1 %时,阻尼比随动应变的增加而迅速增加,而后则逐渐趋于稳定。由此可以看出,不同类型尾矿砂其动应变幅值明

显不同,且阻尼比临界值也与尾矿砂类型有很大关系。同时,随着阻尼比增加,尾矿砂逐渐由弹性变形向塑性变形发展,而当阻尼比接近最大值时,尾矿砂基本处于塑性变形阶段,因此这部分塑性变形已经无法恢复,导致尾矿砂出现残余塑性变形,尾矿砂的初始结构也逐渐被破坏,相应地其剪切刚度也快速降低。

4 结 论

1)通过现场勘察取样,对某尾矿库4种不同类型的尾矿砂特征进行了描述和物理参数测试。

2)采用STX-200液压伺服式动三轴试验仪对4种尾矿砂试样的动弹性模量、动剪切模量及阻尼比等参数进行了试验测试。结果表明:①试样初始弹性模量随动应变的增大而减小,且动弹性模量与试样固结时的围压有很大关系;②试样初始动剪切模量从大到小依次为尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉质黏土;动剪切模量随动应变的增大先减小后趋于稳定,其与试样固结时的围压也有很大关系;③试样最大阻尼比从大到小依次为尾粉质黏土、尾中砂、尾细砂、尾粉砂;阻尼比随动应变的增大而先增大后趋于稳定,且在不同动应变阶段的变化趋势基本一致;围压对试样阻尼比的影响较小。

3)研究结果为尾矿库在地震等动力作用下的液化分析提供了基础参数。

[参 考 文 献]

- [1] WEI Z A, YIN G Z, WANG J G, et al. Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: Case studies of failures[J]. Waste Management and Research, 2013, 31(1): 106-112.
- [2] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. A review of the Euro-

- pean incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846-852.
- [3] YIN G Z, WEI Z A, WANG J G, et al. Interaction characteristics of geosynthetics with fine tailings in pullout test[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(6): 428-436.
- [4] LYU Z J, CHAI J R, XU Z G, et al. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(9): 1-18.
- [5] 郭廷亨, 赵周能. 我国尾矿库事故致灾机理分析及防范对策[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(4): 31-34.
- [6] RICO M, BENITO G, DIEZ-HERRERO A. A floods from tailings dam failures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/2/3): 79-87.
- [7] 王文松, 尹光志, 魏作安, 等. 基于时程分析法的尾矿坝动力稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 271-279.
- [8] 刘佳浩, 刘红岩, 邹宗山, 等. 竖向及水平地震作用下尾矿库动力响应及液化稳定性分析[J/OL]. 金属矿山: 1-14[2024-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20231120.1147.002.html>.
- [9] 陈敬松, 张家生, 孙希望. 饱和尾矿砂动强度特性试验结果与分析[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 603-607.
- [10] 张超, 杨春和, 白世伟. 尾矿料的动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 35-40.
- [11] 张向东, 刘源浩, 曹艳. 尾中砂动应力试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(12): 1640-1644.
- [12] 孙从露, 邵龙潭, 郭晓霞. 尾矿砂不同频率动三轴试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(11): 69-73.
- [13] 刘潇, 姬迎春, 赵俭斌, 等. 尾矿砂液化特性试验研究[J]. 工程勘察, 2015, 43(2): 15-18, 24.
- [14] 杜艳强, 杨春和, 巫尚蔚. 循环荷载下尾矿粉土的孔隙水压力特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 583-588.
- [15] 杨东旭, 孙兆涛. 某尾矿库勘察中尾矿砂的动强度研究[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 557-561.
- [16] 陈志斌, 王光进, 周汉民, 等. 饱和层状尾矿砂动力特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(4): 17-23.
- [17] 高盟, 王滢. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [18] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1972, 98(7): 667-692.

Study on the dynamic characteristics of tailings sand by dynamic triaxial test

Chang Li'an¹, Zhang Jihong^{1,2}, Peng Xianglin²

(1. Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry;
2. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Tailings Reservoirs)

Abstract: A tailings reservoir is a site for storing tailings after mineral processing. The tailings sand mainly consists of fine sand, silt, and other non-cohesive soils, which are often saturated and thus prone to liquefaction under seismic action, leading to the instability and failure of tailings dams. Taking a specific tailings reservoir as the research object, the study conducted field surveys and sampling, and described and tested the physical parameters of 4 types of tailings sand: medium tailings sand, fine tailings sand, silt tailings sand, and silty clay tailings. Using the STX-200 hydraulic servo dynamic triaxial testing apparatus, the study performed dynamic tests on the tailings sand samples to determine their dynamic elastic modulus, dynamic shear modulus, and damping ratio. The results show that the initial dynamic elastic modulus and initial dynamic shear modulus of the samples first decrease and then stabilize with the increase of dynamic strain and are significantly affected by the confining pressure of the samples; as the dynamic shear strain increases, the damping ratio of the samples shows a clear nonlinear increase, initially rising rapidly and then increasing slowly and tending to stabilize, with little influence from confining pressure. The test results provide data support for the dynamic liquefaction analysis of tailings reservoirs under seismic action.

Keywords: tailings sand; liquefaction; dynamic triaxial test; hysteresis curve; dynamic parameters