DOI：10.16285/j.rsm.2016.0921

不同固结条件下尾矿动孔压演化规律

张修照[1,2,3]，巫尚蔚[4]，张　超[1]，杨春和[1]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；4. 重庆科技学院 安全工程学院，重庆 401331）

摘　要：地震作用下尾矿坝有液化失稳的危险，尾矿动孔压的演化规律可以间接体现其液化过程。为研究尾矿动孔压的演化规律，开展了一系列的动三轴试验。结果表明：尾矿动孔压演化具有明显的阶段性，在等压固结时可用 S 形反正弦函数曲线描述，在偏压固结时可用 J 形指数函数曲线描述；尾矿材料在等压固结条件下临界孔压接近于围压，在偏压固结条件下临界孔压小于围压，且随围压及固结应力比的增大而减小，随尾矿平均粒径的增大而增大。基于极限平衡理论推导了等压固结和偏压固结条件下的临界孔隙水压力方程，从理论上阐释了试验结果所揭示的动孔压演化规律，可以为地震区上游式尾矿坝的抗震设计提供参考。

关　键　词：尾矿；动三轴试验；动孔压演化规律；孔隙水压力模型；临界孔压

中图分类号：TU 411　　**文献识别码：**A　　**文章编号：**1000－7598 (2018) 03－0815－08

Dynamic pore-water pressure evolution of tailings under different consolidation conditions

ZHANG Xiu-zhao[1,2,3], WU Shang-wei[4], ZHANG Chao[1], YANG Chun-he[1]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China; 4. Safety Engineering College, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Tailings dam is in danger of liquefied instability under earthquake. The liquefaction process can be indirectly reflected by the evolution rule of the dynamic pore-water pressure. To study the dynamic pore-water evolution, a series of dynamic triaxial tests is conducted. The results show that: the development of dynamic pore-water pressure of the tailings is characterized with different stages, including an S-shaped curve under isotropic consolidation and a J-shaped curve under anisotropic consolidation. The critical pore-water pressure of tailings is close to confining pressure under isotropic consolidation. The critical pressure, less than confining pressure under anisotropic consolidation, decreases with the increase of confining pressure and consolidation stress ratio, and increases as the average particle size of tailings increases. The critical pore-water pressure equations under the condition of isotropic consolidation and anisotropic consolidation are derived based on the theory of limit equilibrium, which explain the dynamic evolution of pore-water pressure observed in dynamic triaxial tests. The results provide reference for seismic design of upstream tailings dam in earthquake area.

Keywords: tailings; dynamic triaxial tests; pore-water pressure evolution rule; pore-water pressure model; critical pore-water pressure

1　引　言

近年来，尾矿坝坝体在地震过程中的动力失稳现象引起了人们的广泛关注，国内外学者已对地震作用下尾矿的破坏机制、动力学特性、液化判据和动孔压演化规律等展开了广泛的研究[1]。以 Ishihara 等[2]为代表的学者认为，动孔隙水压力模型可以反映饱和砂土的振动液化过程，是间接反映液化过程的重要指标。动孔隙水压力演化规律是指从动荷载开始施加直至试样破坏的过程中，孔隙水压力随振

收稿日期：2016-04-25
基金项目：国家重点研发计划项目（No.2017YFC0804600）；国家自然科学基金（No.51741410）；国家自然科学基金重点项目（No.51234004）。
This work was supported by the National Key R. & D. Program of China (2017YFC0804600), the National Natural Science Foundation of China (51741410) and the State Key Program of National Natural Science of China (51234004).
第一作者简介：张修照，男，1979 年生，博士研究生，高级工程师，主要从事尾矿坝灾害形成机制与防治方面的研究工作。E-mail: 78061735@qq.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

动次数的变化规律[3]。从有效应力的角度讲，地震条件下尾矿坝的动力失稳过程，就是在循环载荷作用下，土体内孔隙水压力周期性增长，直至有效应力消散的过程[4]。研究循环载荷下尾矿的动孔压演化规律是进行有效应力动力反应分析的基础，而目前对循环载荷下尾矿动孔压演化规律的深入研究相对较少。

目前，国内外学者已对尾矿动孔隙水压力的演化规律进行了一定的研究，并取得了一些具有代表性的成果。Seed 等[5]根据饱和砂土的动三轴试验，提出了孔压比与加荷周期比间服从反正弦三角函数，奠定了对孔压演化规律的研究基础。张超等[6]在此基础上对 Seed 模型进行了修正，提出了适用于尾矿料的动孔隙水压力预测公式。尹光志等[7]测试了细粒尾矿的动力特性，发现动孔隙水压力对细粒尾矿动强度的影响较小。陈存礼等[8]对不同固结状态下的饱和尾矿进行了动三轴试验，指出动应力、固结围压变化对饱和尾矿的孔压增长曲线基本没有影响，而固结应力比变化对其有较明显的影响。于浩等[9]对两种尾矿料在不同固结比条件下孔隙水压力的变化进行了研究，结果显示孔隙水压力的增长主要发生在振动前期，固结比对孔隙水压力的发展有较为明显的影响。张建民等[10]通过对 20 多种孔压模型的考察总结出动孔压增长的 3 种模式为

$$\left.\begin{aligned} u^* &= u_{\mathrm{f}}(1-\mathrm{e}^{-\beta\frac{t}{t_{\mathrm{f}}}}) && \text{(A 型)} \\ u^* &= \frac{2}{\pi}u_{\mathrm{f}}\sin^{-1}\left(\frac{t}{t_{\mathrm{f}}}\right)^{\frac{1}{2a}} && \text{(B 型)} \\ u^* &= u_{\mathrm{f}}\left[\frac{1}{2}\left(1-\cos\pi\frac{t}{t_{\mathrm{f}}}\right)\right]^{b} && \text{(C 型)} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中：β、a、b 为计算参数；t 为振动持续时间；u_{f} 为孔压 u^* 增长过程中的最大值；t_{f} 为与 u_{f} 对应的振动持续时间。

在尾矿动力特性的研究中，对不同固结条件下动孔压演化规律的研究还没有得到足够重视，且各因素对动孔压发展的影响尚不明确[11]。在实际工程中，不同条件下土体的动力破坏过程和动孔压演化规律也有一定的差异[12]。

本文以四川攀枝花地区铁尾矿为基础，通过不同固结应力比条件下的动三轴试验，研究了循环载荷作用下尾矿的动孔压演化规律，总结了尾矿孔压发展的两种模式，建立了等压、偏压固结条件下的尾矿动孔压发展模型，并基于极限平衡理论推导出等压固结和偏压固结条件下的临界孔隙水压力方程，从理论上阐释了试验结果所揭示的动孔压演化规律。

2 试验设备及试样

本试验采用 DDS-70 型微机控制电磁式振动三轴试验系统，该系统由主机、电气控制微机系统、静态压力控制系统组成，轴向最大动出力为 1 373 N，侧限压力为 0～0.8 MPa，反压为 0～0.3 MPa，最大允许轴向位移为 12.5 mm。

本试验项目尾矿材料取自四川省攀枝花地区某大型铁矿尾矿库，经化验尾矿中以 SiO_2、CaO 和 FeO 含量最高，分别达到 35.55%、14.30%和 13.59%，其他还含有 Al_2O_3、MgO、Fe_3O_2 等，但含量均不足 9%。试验前对试样颗粒分析，按级配曲线将尾矿划分为尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉土 4 类。各类尾矿的级配曲线见图 1。

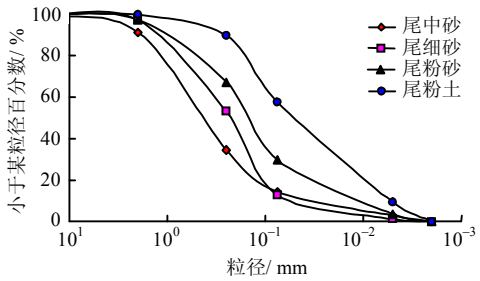


图 1 尾矿级配曲线

Fig.1 Grading curves of tailings

3 试验过程

对尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉土 4 组试样先用抽气饱和法进行饱和，然后分别在固结应力比 K_{c} 为 1.0、1.5、2.0 的条件下进行固结。固结稳定后施加循环载荷，直至破坏。循环载荷采用等幅剪应力循环加载方式。

试验时具体操作步骤按照《土工试验规程》[13]进行。鉴于孔压发展规律并不依赖于破坏标准的选择（不同破坏标准下仅材料濒临破坏时的临界孔压值有所差异），为便于分析比较，本文试验中以破坏应变作为终止试验的标准：均等固结压力（$K_{\mathrm{c}}=1.0$）的破坏应变标准为双幅轴向动应变的 5%，非均等固结压力（$K_{\mathrm{c}}>1.0$）的破坏标准为总应变（包括残留应变和动应变）的 5%，而在理论分析中则采用极限平衡标准。

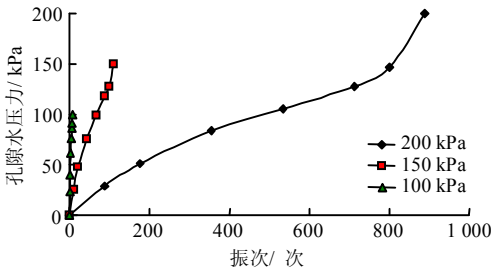
4 试验结果及分析

4.1 围压对尾矿动孔压演化的影响

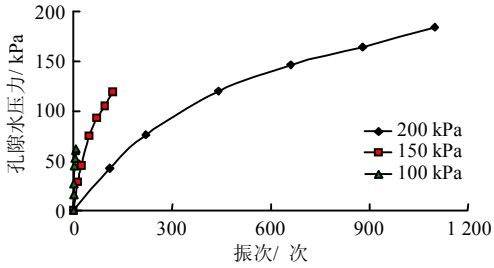
不同围压下尾细砂孔隙水压力演化规律曲线如

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

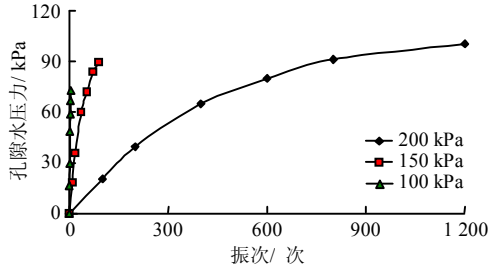
图 2 所示。从图中可以看出：在等压固结条件（K_c = 1.0）下，孔压发展曲线大体上呈“S”型，可分为 3 个阶段，即初始阶段、稳定增长阶段和破坏性增长阶段，详见 4.4 节论述。



(a) K_c = 1.0



(b) K_c = 1.5



(c) K_c = 2.0

图 2　不同围压下孔压发展规律曲线

Fig.2　Pore-water pressure curves under different pressures

围压对孔压发展的影响主要体现在：围压越大，达到相同孔压所需的加荷周数（振次）越多，试样开始破坏时的临界孔压也越大，材料抗液化能力越强；围压越大，初始阶段孔压发展曲线斜率变化越慢，破坏性增长阶段孔压发展曲线斜率变化越快。

在偏压固结条件（K_c>1.0）下，围压对孔压发展的影响与各向等压固结条件基本相同。唯一不同的是，偏压固结下的孔压发展没有破坏性增长阶段，开始破坏时的临界孔压始终小于围压，且围压越大，临界孔压越大。

4.2　固结应力比对尾矿动孔压演化的影响

固结应力比对孔隙水压力发展的影响如图 3 所示。

从图中可以看出：随着固结比的增大，动孔压发展规律曲线的形状发生了变化，且有向下移动的趋势；固结比越大，达到相同孔压所需的加荷周期数越多。

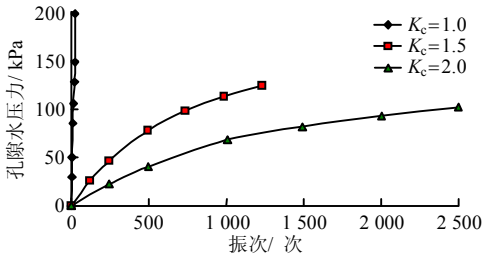


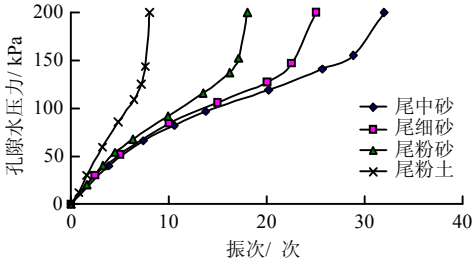
图 3　不同固结比时孔压发展规律曲线(σ_3=200 kPa)

Fig.3　Pore-water pressure curves under different consolidation ratios (σ_3=200 kPa)

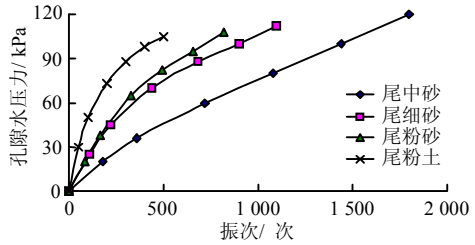
K_c = 1.0 时的孔压最后阶段的上升具有突变性。说明在较小的振次范围内，孔压突然升高，尾砂结构失去稳定性，这是因为在小应变不断积累的过程中，尾砂颗粒的重排突然加速，使彼此之间失去了接触，进而导致试样液化失稳。

4.3　平均粒径对尾矿动孔压演化的影响

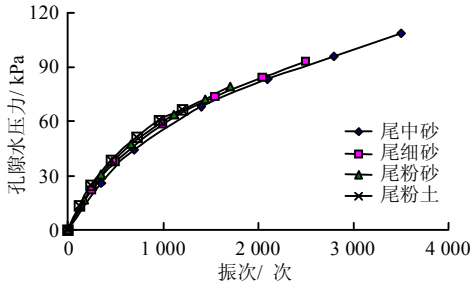
尾矿平均粒径对孔隙水压力发展的影响如图 4 所示。



(a) K_c = 1.0



(b) K_c = 1.5



(c) K_c = 2.0

图 4　不同粒径尾矿的孔压发展规律曲线(σ_3=200 kPa)

Fig.4　Pore-water pressure curves under different grain sizes (σ_3=200 kPa)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从图中可以看出，平均粒径对孔隙水压力发展的影响较大。从尾中砂、尾细砂、尾粉砂到尾粉土，相同振次下的孔压逐渐增大，孔压发展规律曲线依次抬升。试样的平均粒径越大，相同振次时孔压越小，材料抗液化能力越强。等压固结时，尾矿试样平均粒径越小，孔压发展初始阶段的曲线越平缓，破坏性增长阶段的曲线越陡峭，且破坏时的孔压与围压非常接近。偏压固结时，不同粒径尾矿试样在开始破坏时的临界孔压均小于围压，且平均粒径越大，临界孔压越大。

尾矿孔隙水压力的发展主要与土体的透水能力和黏聚力有关。对于砂质土和粉质土，颗粒之间缺乏黏聚力，孔隙水压力的上升主要是由透水性决定的[14]。当尾矿颗粒粒径变小时，土体内的孔隙也随之变小，导致土体渗透性降低，土体内的孔隙水也很难排出。而当孔隙水压力积累到一定程度时，土体的有效应力急剧降低，直至孔隙水压力等于固结压力，有效应力降低为 0，土体抗剪强度完全消失，这在宏观上即表现为尾矿的液化。

4.4 尾矿动孔压演化规律

为充分说明动孔压的增长规律，需将孔压和振次分别做归一化处理，图 5 为归一化处理后典型的尾矿动孔隙水压力演化曲线。图中横坐标为振次比，即试验振动次数 N 与尾矿试样破坏时的振动次数 N_L 之比值 N/N_L；纵坐标为孔隙水压力比，简称孔压比，即孔隙水压力与围压之比 u/σ_3。

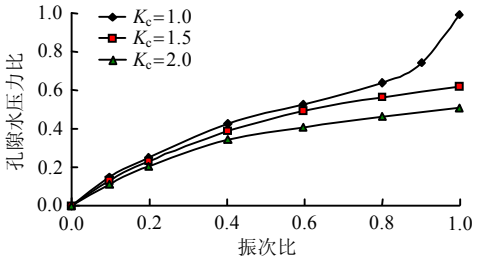


图 5 孔隙水压力发展规律曲线

Fig.5 Representative pore-water pressure curves

从图 5 可以看出：在等压固结条件（$K_c = 1.0$）下，孔隙水压力的发展规律可用 S 型反正弦函数曲线描述，分为 3 个阶段。在对尾矿材料循环加载的初始阶段，孔压的增加随振动次数的增加迅速上升，而后增加速率逐渐变慢，曲线斜率逐渐变小，形状呈上凸形，该阶段的振次比大致在 0.0～0.2 之间；当振次比处于 0.2～0.8 之间时，尾矿材料的动孔压进入稳定增长阶段，该阶段孔压增加随振动次数的增加平稳上升，曲线斜率较小，近似呈直线型；当振次比大于 0.8 时，尾矿材料的动孔压进入破坏性增长阶段，该阶段孔压增加值随振动次数的增加急剧上升，曲线斜率变大，形状呈下凸形。等压固结条件下试样临界孔压比接近于 1.0。

对于等压固结条件（$K_c = 1.0$）下的孔压增长曲线分为 3 个阶段，可从尾矿的散体颗粒性和渗透性两方面予以分析[15]：由于尾矿颗粒较小，渗透系数较低，因此在开始阶段孔隙水压力不易消散，孔压快速增长，即快速增长阶段；孔隙水压力的增加使得尾矿中细小黏粒向其他孔压较低的部位转移，颗粒体变势减小，导致孔压增速降低，即稳定增长阶段；随着细小黏粒的转移，试样结构遭到破坏，孔压加速增长，直到孔压趋于围压，即破坏性增长阶段。

在偏压固结条件（K_c 为 1.5、2.0）下，孔压发展曲线可用 J 型指数函数曲线描述，分为 2 个阶段。尾矿材料在循环加载的初始阶段，动孔压随振动次数的增加快速上升；当振次比约大于 0.4 时，随振动次数的继续增加，孔压增长速率逐渐减小，临界孔压比趋于某一稳定值，且固结比越大，临界孔压比越小。总体上，在循环荷载作用下，随振次比增加，偏压固结时孔隙水压力发展曲线的斜率逐渐减小，曲线整体呈上凸形。

根据不同固结比时的试验结果，偏压固结条件下试样的临界孔压均小于围压，即临界孔压比小于 1.0，且固结比越大，临界孔压比越小。汪闻韶[14]认为，固结应力比大于 1.0 时，孔压降低的原因有二：首先，是由于偏应力的存在，试验时将产生剪切作用，由于剪切对砂土颗粒骨架结构的扰动，将使砂土颗粒产生重新排列，从而使其抗震稳定性有所提高；其次，是剪应力对振动时砂土体积变化的影响。在有剪应力的情况下，振动时砂土颗粒有互相翻越的趋向，减小砂土体积的压缩量，振动孔隙水压力减小。

对于等压固结条件下的动孔压发展模式，根据曲线凹凸性的变化规律，可以用 Seed 模型描述[5]，其表达式为

$$\frac{u}{\sigma_3} = \frac{2}{\pi}\arcsin\left(\frac{N}{N_L}\right)^{1/\theta} \tag{2}$$

式中：θ 为表示土性质的试验参数，其值与土的种类和密度有关；σ_3 为围压。

等压固结 Seed 模型拟合曲线如图 6 所示。对于

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

偏压固结条件下动孔压的发展模型，Seed 模型并不完全适用[15]。综合试验结果，提出偏压固结条件下尾矿的动孔压上升模型，其具体表达式为

$$\frac{u}{\sigma_3}=\alpha(1-\mathrm{e}^{-\beta\frac{N}{N_L}}) \tag{3}$$

式中：α、β 为试验参数，受固结比、围压和平均粒径等多种因素的影响，决定着孔压发展规律曲线的上凸曲率及最大孔压比。对于尾矿材料，相应的拟合曲线如图 7 所示。

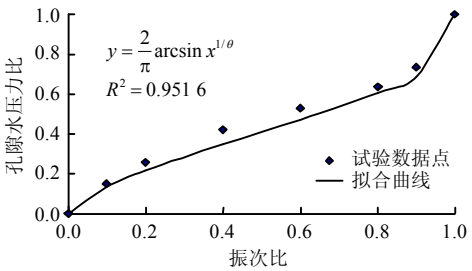


图 6　等压固结条件下孔压发展规律拟合曲线

Fig.6　Fitting curve of pore-water pressure under isotropic consolidation

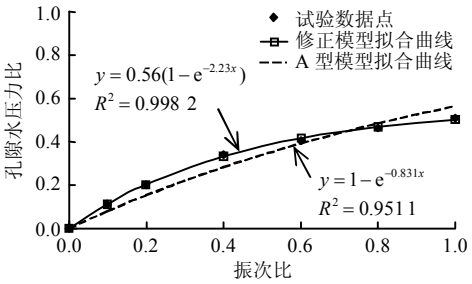


图 7　偏压固结条件下孔压发展规律拟合曲线

Fig.7　Fitting curves of pore-water pressure under anisotropic consolidation

5　尾矿动孔压演化影响因素解析

从上述试验结果可以看出，尾矿动孔压演化规律受多种因素的影响。为便于分析这些因素对尾矿动孔压演化的影响，可采用极限平衡标准，分析材料在极限平衡状态下（材料刚开始破坏时）的孔隙水压力，即临界孔隙水压力 u_{cr} 受其影响的情况。

假定材料的静力极限平衡条件也适用于动力试验中，且动载荷与静载荷的 Mohr-Coulomb 破坏包络线相同，即试样的动力有效内摩擦角等于静力有效内摩擦角。图 8 中，应力圆①表示试样振动前的应力状态，应力圆②表示动荷载施加过程中最大的应力圆，即动应力等于其幅值 σ_d 瞬间的应力圆。动荷载施加过程中，试样内的孔隙水压力将不断发展，用有效应力表示时，应力圆②将不断向破坏包络线移动（此处为向左移动）。当孔隙水压力达到临界值 u_{cr} 时，应力圆与破坏包络线相切。按极限平衡条件，这时材料达到破坏状态。

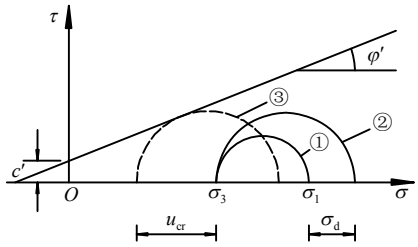


图 8　极限平衡状态下的临界孔隙水压力

Fig.8　Critical pore-water pressure at the condition of limit equilibrium

根据图 8 中几何条件，可以推导出极限平衡状态时的临界孔隙水压力为

$$u_{cr}=\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}+\frac{c'}{\tan\varphi'}-\frac{\sigma_1-\sigma_3+\sigma_d(1-\sin\varphi')}{2\sin\varphi'} \tag{4}$$

式中：c'、φ' 分别为试样的静、动力有效黏聚力和有效内摩擦角；σ_d 为动应力幅值；σ_1 为轴压。

从式（4）可以看出，临界孔压 u_{cr} 与材料有效抗剪强度指标 c'、φ'、试验时的轴压 σ_1、围压 σ_3 和动应力幅值 σ_d 有关。在分析临界孔压受某一因素的影响时，将先假定其他影响因素固定不变。

5.1　等压固结时动孔压演化影响因素解析

5.1.1　等压固结时围压对动孔压演化影响解析

在各向等压固结条件（$K_c=1.0$）下，即 $\sigma_1=\sigma_3$ 时，由式（4）可以推导出各向等压固结条件下的临界孔隙水压力方程：

$$u_{cr}=\sigma_3+\Delta\sigma \tag{5}$$

且有

$$\Delta\sigma=\frac{\sigma_d(\sin\varphi'-1)}{2\sin\varphi'}+\frac{c'}{\tan\varphi'} \tag{6}$$

从式（5）可以看出，临界孔压 u_{cr} 与围压 σ_3 成线性关系，围压越大，则临界孔压相应越大，尾矿抗液化能力越强。

从式（5）还可以看出，当 $\sigma_d=0$ 时，$u_{cr}=\sigma_3+c'/\tan\varphi'$，即在静力条件下，尾矿材料由于黏聚力的存在，而能够承受稍高于围压的临界孔

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

压，即材料内部容许出现较低的拉应力，其大小为 $c'/\tan\varphi' = 10$～20 kPa，且随尾矿平均粒径的增大而减小。

当 $\sigma_d > 30$ kPa 时，$\Delta\sigma < 0$，$u_{cr} < \sigma_3$，即孔压在达到围压前材料就已发生破坏，此时材料未达到完全液化，尚处于部分液化阶段，故极限平衡标准比液化标准低一些，低的数值即为 $\Delta\sigma$。

5.1.2 等压固结时尾矿粒径对动孔压演化影响解析

式（4）及式（5）中虽未直接出现粒径参数，但含有抗剪强度指标参数，粒径和抗剪强度指标之间有很强的相关性，因此可用抗剪强度指标参数间接反映尾矿平均粒径的大小。

将式（5）改写得到等压固结条件下能够间接反映尾矿粒径与临界孔隙水压力关系的方程：

$$u_{cr} = \sigma_3 + \frac{\sigma_d}{2} + \frac{2c'\cos\varphi' - \sigma_d}{2\sin\varphi'} \tag{7}$$

对于常见尾矿，当 $\sigma_d > 30$ kPa 时，式（7）最后一项为负值，且随 φ' 增大而增大，则 u_{cr} 是 φ' 的增函数，因此可以看出临界孔压与土样的有效抗剪强度指标具正相关性。影响土的抗剪强度的因素，如尾矿的组成、密度、结构、应力状态等，也都将影响动荷载作用下试样的临界孔压。一般情况下，尾矿平均粒径越大，其有效内摩擦角越大，有效黏聚力越小，则相应的临界孔压越大，材料抗液化能力越强。

5.1.3 等压固结时应力幅值对动孔压演化影响解析

从式（5）可以看出，临界孔压与动应力幅值成线性关系，线性比例系数为 $-(1-\sin\varphi')/(2\sin\varphi')$，比例系数与尾矿的性质有关。对于中粗粒尾矿，其值约为−0.4；对于细粒尾矿，其值约为−2.0。对某一给定尾矿样，此比例系数不变。动应力幅值越大，相应的临界孔压越小，材料则越容易达到破坏状态。

对于常见尾矿材料，$\sigma_d = 30$ kPa 时，$\Delta\sigma \approx 0$；$\sigma_d < 30$ kPa 时，$\Delta\sigma > 0$，且 $\Delta\sigma$ 随 σ_d 的减小而增大。因此，对于 $\sigma_d \leqslant 30$ kPa 的小幅值动荷载，尾矿材料一般不会发生破坏，对于黏性尾矿，则其能承受的动应力幅值可达到 40～50 kPa。故试验动应力幅值应大于 50 kPa。

5.2 偏压固结时动孔压演化影响因素解析

5.2.1 偏压固结时围压对动孔压演化影响解析

在偏压固结条件（$K_c > 1.0$）下，将 $\sigma_1 = K_c\sigma_3$ 代入式（4），得到偏压固结条件下的临界孔隙水压力方程：

$$u_{cr} = \frac{\sigma_d(\sin\varphi' - 1)}{2\sin\varphi'} + \frac{c'}{\tan\varphi'} + \lambda\sigma_3 \tag{8}$$

式中：λ 为临界孔压比，为材料开始破坏时的孔压，即临界孔压与围压之比：

$$\lambda = \frac{1+\sin\varphi'}{2\sin\varphi'} - \frac{1-\sin\varphi'}{2\sin\varphi'}K_c \tag{9}$$

从式（8）可以看出，偏压固结条件下，临界孔压与围压具备相关性，但相关性的正负取决于临界孔压比 λ 的正负，即取决于尾矿的有效内摩擦角及其固结应力状态。

令 $\lambda = 0$，从式（9）可以解得

$$\varphi_c' = \arcsin\frac{K_c - 1}{K_c + 1} \tag{10}$$

式中：φ_c' 为动孔压界限有效内摩擦角（简称动限角）。当 $\varphi' > \varphi_c'$ 时，$\lambda > 0$，临界孔压与围压呈现正相关性；当 $\varphi' < \varphi_c'$，$\lambda < 0$，临界孔压与围压呈现负相关性。当 $\varphi' = \varphi_c'$ 时，$\lambda = 0$，临界孔压不受围压变化的影响。因此，φ_c' 的物理意义即为偏压固结时的临界孔压与围压呈现正相关性时的最小有效内摩擦角。

从式（10）可以看出，动限角 φ_c' 随固结比而变化。当固结比较大时，φ_c' 也较大，此时，常见尾矿样的有效内摩擦角将会小于动限角 φ_c'，则临界孔压与围压呈负相关性。当固结比接近于 1 时，动限角 φ_c' 接近于 0，而一般性尾矿的有效内摩擦角 $\varphi' > \varphi_c' > 0$，临界孔压与围压呈正相关性，这即类似于等压固结时的情况。

根据式（10）计算出不同固结应力比 K_c 时的动限角 φ_c'，列于表 1 中。

表 1 不同固结比时动孔压界限的有效内摩擦角

Table 1 Cut effective angle of internal friction for dynamic pore water pressure (φ_c') with different consolidation stress ratios (K_c)

K_c	φ_c' / (°)	K_c	φ_c' / (°)
1.2	5	3.0	30
1.5	11	4.0	37
2.0	19		

5.2.2 偏压固结时固结比对动孔压演化影响解析

将式（8）分离出 K_c 后，得

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$u_{cr}=\frac{\sigma_3(1+\sin\varphi')-\sigma_d(1-\sin\varphi')}{2\sin\varphi'}+\frac{c'}{\tan\varphi'}-\frac{\sigma_3(1-\sin\varphi')}{2\sin\varphi'}K_c \tag{11}$$

从式（11）可以看出，临界孔压与固结比具有负相关性，即固结比越大，临界孔压越小，尾矿抗液化能力降低。

另外，从式（9）还可以发现，由于$\sin\varphi'<1$，故临界孔压比λ随固结应力比K_c的增大而减小。将式（9）变换形式后得

$$\lambda=\frac{K_c+1}{2}-\frac{K_c-1}{2\sin\varphi'} \tag{12}$$

可见，在固结应力比 K_c>1.0 时，临界孔压比$\lambda<1$，且当平均粒径增大时，有效内摩擦角增大，临界孔压比随之增大。

类似于等压固结时的情况，令

$$\Delta\sigma'=\frac{\sigma_d(\sin\varphi'-1)}{2\sin\varphi'}+\frac{c'}{\tan\varphi'} \tag{13}$$

则有

$$u_{cr}=\Delta\sigma'+\lambda\sigma_3 \tag{14}$$

对于常见尾矿，在$\sigma_d=30$ kPa 时，$\Delta\sigma'\approx0$；$\sigma_d>30$ kPa 时，$\Delta\sigma'<0$，且$\Delta\sigma$随σ_d的增大而减小。因此，一般情况下，$u_{cr}<\sigma_3$，即在给定动应力幅值条件下，临界孔压为某一小于围压的数值，且固结比越大，临界孔压越小。

5.2.3 偏压固结时尾矿粒径对动孔压演化影响解析

将式（8）变换形式后得

$$u_{cr}=\frac{(1-K_c)\sigma_3-\sigma_d}{2}\frac{1}{\sin\varphi'}+\frac{c'}{\tan\varphi'}+\frac{(1+K_c)\sigma_3+\sigma_d}{2} \tag{15}$$

从式（15）中可以看出，偏压固结时尾矿平均粒径对临界孔压的影响与等压固结时情况类似，平均粒径增大时，临界孔压增大，尾矿抗液化能力增强。

5.2.4 偏压固结时应力幅值对动孔压演化影响解析

从式（8）可以看出，临界孔压与动应力幅值的关系与等压固结时相同，比例系数也相同，且临界孔压不受动应力幅值的影响，在此不再赘述。

6 讨　论

从各向等压固结条件的孔压演化规律可以看到，孔压发展的最后阶段，孔压会以突然、急剧上升的方式接近或达到围压，形成较为明显的转折点。孔压的突变性增长点可以作为判断尾矿“液化破坏”的判据，因为这时尾矿的内部损伤已经积累到一定程度，引起了结构性破坏，失去了原有的承载特性。

另外，从试验结果来看，偏压固结表面上看没有孔压急剧上升至固结压力的阶段，这其实是由试验规定的液化标准导致的。对非均等固结（$K_c>1.0$）动三轴的破坏标准为总应变 5%，此时土体变形很大，但是在轴压的作用下，并没有引起结构性破坏。可以推测，当试验继续进行时，偏压情况下也可能出现孔压突然、急剧上升的情况。

目前土体液化的判据主要是从宏观上考虑的。实际上，液化现象本身就是尾矿土体结构突变的宏观反映，要想解释尾矿液化现象，必须研究动孔压的发展与材料结构变化的关系，并结合突变理论研究孔压演化曲线中突变点的物理意义。

7 结　论

（1）在循环载荷作用下，尾矿的孔压发展规律有各向等压固结和偏压固结 2 种基本形式。各向等压固结条件下的孔压发展分为 3 个阶段，可以用 S 形反正弦函数曲线描述，而偏压固结条件下的孔压发展只有 2 个阶段，可以用 J 形指数函数曲线描述。

（2）围压有限制尾矿骨架结构动力破坏的作用。围压对孔压发展的影响集中体现在孔压发展的初始阶段和破坏性增长阶段。在初始阶段，围压越大，孔压发展曲线斜率变化越慢，而在破坏性增长阶段，围压越大，孔压发展曲线斜率变化越快。

（3）固结比对动孔压发展规律曲线的形状有重要影响。当固结比$K_c=1.0$ 时，孔压上升的最后阶段具有突变性，且临界孔压均接近于围压；随着固结比的增大，动孔压发展规律曲线向下移动，最后阶段的突变性消失，且临界孔压均小于围压，固结比越大，临界孔压越小。

（4）对于砂性尾矿和粉性尾矿，平均粒径越小，尾矿透水性越差，孔压上升越容易。从尾中砂、尾细砂、尾粉砂到尾粉土，相同振次下的孔压依次增大，抗液化能力逐渐下降。

（5）偏压固结条件下存在一个界限有效内摩擦角φ_c'，当尾矿料的有效内摩擦角$\varphi'>\varphi_c'$时，临界孔压与围压呈现正相关性；当$\varphi'<\varphi_c'$时，临界孔压与围压呈现负相关性。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] LEE C J, SHEN S F. The stiffness degradation and damping ratio evolution of Taipei silty clay under cyclic straining[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2007, 27(8): 730－740.

[2] ISHIHARA K, TATSUOKA F, YASUDA S. Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses[J]. **Soils and Foundations**, 1975, 15(1): 29－44.

[3] 徐斌. 饱和砂砾料液化及液化后变形与强度特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
XU Bin. Experimental study on liquefaction and behavior of post-liquefaction deformation and strength in saturated sand-gravel composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

[4] LIAM Finn W D, LEE K W, MARTIN G R. An effective stress model for liquefaction[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division,** 1977, 103(6): 517－533.

[5] SEED B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1966, 92(SM6): 105－134.

[6] 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.
ZHANG Chao, YANG Chun-he, BAI Shi-wei, Experimental study on dynamic characteristics of tailings material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 25－40.

[7] 尹光志, 李广治, 魏作安. 细粒尾矿动力特性的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(B11): 63－65.
YIN Guang-zhi, LI Guang-zhi, WEI Zuo-an. Experimental research on dynamic characteristics of fine grained tailings[J]. **Mining Research and Development**, 2006, 26(B11): 63－65.

[8] 陈存礼, 何军芳, 胡再强, 等. 动荷作用下饱和尾矿砂的孔压和残余应变演化特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4034－4039.
CHEN Cun-li, HE Jun-fang, HU Zai-qiang, et al. Developing characteristics of pore water pressure and residual deformation of tailings sands under cyclic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 4034－4039.

[9] 于浩, 徐牧明, 陈洪全. 尾矿料的动强度特性试验研究[J]. 土工基础, 2014, (2): 145－149.
YU Hao, XU Mu-ming, CHEN Hong-quan. Dynamic strength characteristic test of tailings material research[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2014, (2): 145－149.

[10] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991, (8): 45－51.
ZHANG Jian-min, XIE Ding-yi. Practical calculation of dynamic pore water pressure in saturated sand[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1991, (8): 45－51.

[11] 阮元成, 郭新. 饱和尾矿料动力变形特性的试验研究[J]. 水利学报, 2003, (4): 24－29.
RUAN Yuan-cheng, GUO Xin. The experimental study of saturated tailings material dynamic deformation characteristics[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (4): 24－29.

[12] 刘红军, 王小花, 贾永刚, 等. 黄河三角洲饱和粉土液化特性及孔压模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, (增刊 2): 83－87.
LIU Hong-jun, WANG Xiao-hua, JIA Yong-gang, et al. Experimental study on liquefaction properties and pore-water pressure model of saturated silt in Yellow River Delta[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (Supp.2): 83－87.

[13] 南京水利科学研究院. SL273-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL273-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.

[14] 汪闻韶. 饱和砂土振动孔隙水压力试验研究[J]. 水利学报, 1962, (2): 37－47.
WANG Wen-shao. Study on pore water pressures of saturated sands due to vibration[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1962, (2): 37－47.

[15] 杜艳强. 细粒尾矿的工程性质及尾矿坝的动力分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
DU Yan-qiang. Engineering properties of fine grained tailings and dynamic analysis of tailings dam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net