

动荷作用下饱和尾矿砂的孔压和残余应变 演化特性

陈存礼, 何军芳, 胡再强, 杨 鹏, 苏永江

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 在不同固结状态下对饱和尾矿砂进行动三轴试验, 探讨饱和尾矿砂的动孔压和动残余应变发展特性。试验结果表明: (1) 动应力、固结围压变化对饱和尾矿砂的孔压增长曲线基本上没有影响, 固结应力比变化对其有较明显的影响。(2) 均压固结和偏压固结时孔压增长曲线形态不同。均压固结时, 可用修正后的 Seed 应力孔压模型表达式来描述; 偏压固结时, 可用指数函数来模拟。(3) 在均压固结和偏压固结条件下饱和尾矿砂均产生较大的残余应变。固结围压、动应力变化对残余应变增长曲线基本上没有影响, 固结应力比对其有明显的影响。(4) 残余应变增长曲线在均压固结和偏压固结时具有明显不同的形态。均压固结时, 可用反正弦函数来描述; 偏压固结时, 可用幂函数来模拟。

关键词: 土力学; 尾矿砂; 动三轴试验; 动孔压; 动残余应变

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 4034 - 06

DEVELOPING CHARACTERISTICS OF PORE WATER PRESSURE AND RESIDUAL DEFORMATION OF TAILINGS SANDS UNDER CYCLIC LOAD

CHEN Cunli, HEN Junfang, HU Zaiqiang, YANG Peng, SU Yongjiang

(*Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China*)

Abstract: Based on dynamic triaxial tests conducted on tailings sands under different consolidation conditions, the developing characteristics of dynamic pore water pressure and residual deformation of tailings sand are studied. It is indicated that: (1) The relationship between pore water pressure ratio and cyclic times ratio is affected by the variation of confining pressure and dynamic stress very little, but it is influenced by consolidation stress ratio. (2) The curve shape of pore water pressure developing under isotropic consolidation is not the same as that under anisotropic consolidations. The relationship of pore water pressure ratio and cyclic times ratio could be described by modified Seed's dynamic pore water pressure model under isotropic consolidations, but by exponential function under anisotropic consolidations. (3) The great residual strain is generated under not only anisotropic but also isotropic consolidation. The relationship between residual strain ratio and cyclic times ratio. is not influenced too much by the variation of confining pressure or dynamic stress, but influenced by the consolidation stress ratio. (4) The curve shape of residual strain developing under isotropic consolidation is not the same as that under anisotropic consolidations. The relationship of residual strain ratio and cyclic times ratio could be described by arcsine function under isotropic consolidations, and by power function under anisotropic consolidations.

Key words: soil mechanics; tailings sands; dynamic triaxial test; dynamic pore water pressure; dynamic residual strain

收稿日期: 2006 - 05 - 26; **修回日期:** 2006 - 06 - 26

作者简介: 陈存礼(1964 -), 女, 博士, 1989 年于陕西机械学院工业企业自动化专业获硕士学位, 现任副教授, 主要从事土静力学和动力学特性方面的教学与研究。E-mail: chencl@xaut.edu.cn

1 引言

尾矿库是冶金、核工业、化工等行业生产过程中贮存废弃料尾矿的重要设施,用湿法输送至尾矿库,绝大部分尾矿坝是用上游法填筑的。尾矿砂是尾矿坝和尾矿库中尾矿料的主要组成部分,由于许多坝的排水系统不完善,因而坝体浸润线很高,使大部分尾矿砂处于饱和状态。我国现有 2 700 多座尾矿库,每年产出的尾矿有 3×10^8 t,且普遍存在加高扩容的问题。许多尾矿坝处于高烈度区,而以往地震引起尾矿库的液化、裂缝、沉降等也时有发生,在尾矿坝设计或加高设计时需要进行尾矿坝的动力稳定性计算,因此,对尾矿砂的动力特性进行试验研究有十分重要的实际意义。由于尾矿砂的矿物成分、颗粒组成等因素的影响,使其动力特性与天然土料相比有其特殊性。为此,许多学者对尾矿砂的动力特性进行了一定的研究^[1~5],但对尾矿砂的动孔压和残余应变发展特性的细致研究较少。且矿石的种类很多,使尾矿砂的矿物成分、粒度、密度、颗粒组成等有显著差异,从而表现出不同的动力特性。本文对一铜矿的尾矿砂进行动三轴试验,研究动荷作用下饱和尾矿砂的动孔压和残余应变特性,为尾矿坝设计及加高设计时进行抗震稳定性计算提供依据。

2 试验的基本情况

试验所用尾矿砂取自于一铜矿的尾矿库,该尾矿库初期坝修建于 1983 年,用上游法填筑。该尾矿坝中的尾矿料可分为尾粉砂和尾粉土,但尾粉土所占比例较小,本文只对尾粉砂的动力特性进行研究。尾粉砂的物理性质试验结果如表 1 所示。由表 1 可知,尾粉砂级配不良,细粒含量大于 10%,其相对密度(2.83)比一般砂土的大。根据现场测试原状样干密度的平均值,采用压样法制备扰动试样。虽然尾粉砂中含有大于 2 mm 的颗粒,但其含量(3.5%)较少,再加之所用仪器的试样直径为 3.91 cm,故试样尺寸取为直径 3.91 cm,高 8 cm。用抽气饱和法对试样进行饱和,经检验饱和度达 95% 以上。

固结应力比 k_c 分别为 1 和 2,在每一个固结应力比下围压均为 200, 400, 600 kPa。试验仪器为微机控制多功能三轴仪。研究频率 1~5 Hz 的随机地震荷载作用下尾矿砂的动力特性时,常施加一定幅

表 1 尾矿砂的物理性质指标

Table1 Physical indexes of tailing sand

颗粒大小组成百分比/%				不均 匀系数 C_u	曲率 系数 C_c	平均 粒径 d_{50}/mm	相对 密度 G	平均 干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
砂粒 2.0~ 0.5 mm	0.50~ 0.25 mm	0.250~ 0.075 mm	细粒 <0.075 mm					
3.5	24.6	44.6	27.3	5.14	0.99	0.145	2.83	1.55

值的谐波,为此,试验时振动波形为正弦波,频率为 1 Hz。

试样固结完成后,关闭排水开关,施加一定幅值的动应力进行振动,直到试样产生破坏为止。在一定固结应力状态下施加 4 个不同幅值的动应力进行试验。均压固结时,把应变达到 5% 作为破坏标准,且应变反向时取双幅应变,应变不反向时取弹性应变与塑性应变之和;偏压固结时,取综合应变等于 10% 作为动应变的破坏标准。试验和资料整理均根据《土工试验规程》(SL23F - 1999)^[6]进行。

3 试验结果及分析

3.1 动孔压特性

相同固结应力条件(一定的固结围压 σ_{3c} , k_c),不同动应力 $\sigma_d(N_f)$ 下动孔压比 u_d/σ'_m 与振次比 N/N_f 的典型关系示于图 1。 k_c 相同、 σ_{3c} 不同时,施加不

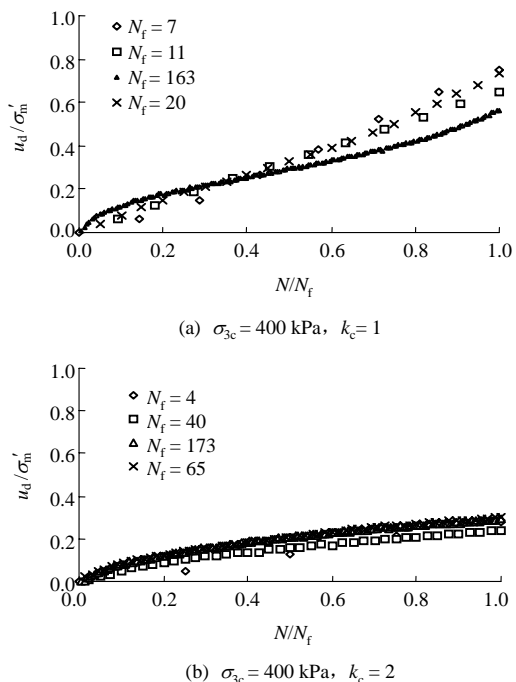


图 1 不同动应力条件下 u/σ'_m 与 N/N_f 的关系
Fig.1 Relationship between u/σ'_m and N/N_f under different dynamic stresses

同的动应力得到动孔压比 u_d/σ'_m 与振次比 N/N_f 的关系示于图 2。其中 σ'_m ($\sigma'_m = (\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c})/3$) 为固结有效平均应力, N_f 为破坏振次。

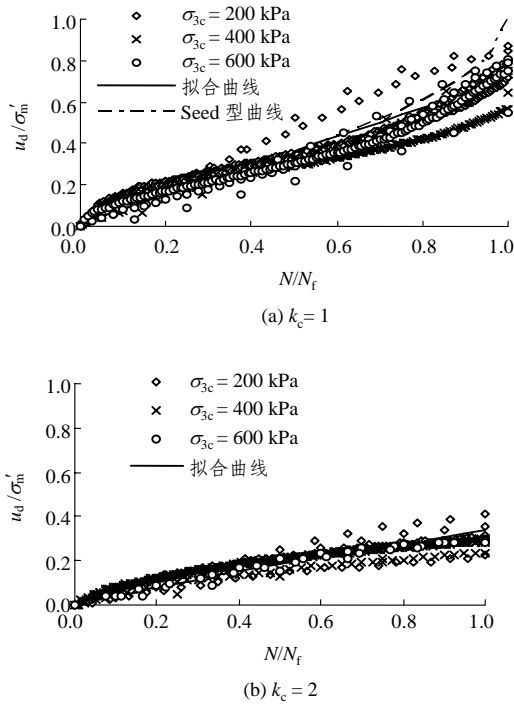


图 2 不同固结围压条件下 u/σ'_m 与 N/N_f 的关系

Fig.2 Relationship between u/σ'_m and N/N_f under different consolidation confining pressures

试验结果表明:

(1) 固结应力比 k_c 不同时, 尾矿砂的动孔压发展特性是不同的(见图 1, 2)。均压固结($k_c = 1$)时, 在开始振动阶段动孔压比 u_d/σ'_m 随振次比 N/N_f 的增大而快速增大; 当动孔压比 u_d/σ'_m 发展到 0.2 以上时, 孔压发展的速率逐渐减小; 当动孔压比 $u_d/\sigma'_m > 0.5$ 时, 动孔压发展的速率又随着振次比的增大而趋于快速增长; 动孔压的这种发展特性使 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系曲线由两段组成, 即动孔压比 $u_d/\sigma'_m \leq 0.5$ 时的下凹段和大于 0.5 时的上凹段, $u_d/\sigma'_m = 0.5$ 为曲线上的反弯点, 可作为两个发展过程的分界点; 则这种动孔压发展特性与 Seed 等人提出的孔压的应力模型曲线形态相吻合。当偏压固结($k_c = 2$)时, 在开始振动阶段动孔压比 u_d/σ'_m 也随振次比 N/N_f 的增大而快速增大; 当动孔压比 $u_d/\sigma'_m = 0.2$ 以上时, 孔压发展的速率随振次比 N/N_f 的增大而逐渐减小; 动孔压的这种发展特性使 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系曲线呈下凹形态。

(2) 固结应力条件相同(一定的 σ_{3c} , k_c)时, 动应力 $\sigma_d(N_f)$ 变化对 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系基本上没有影

响。动应力 σ_d 不同时, $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系试验点分布范围较窄(见图 1), 即动应力 $\sigma_d(N_f)$ 变化对 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系的影响相对较小, 不同动应力 σ_d 下 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系曲线可近似地归一。

(3) 固结围压 σ_{3c} 相同时, 固结应力比 k_c 变化对 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系有较明显的影响(见图 1)。当振次比 N/N_f 相同时, 所产生的动孔压比 u_d/σ'_m 随固结应力比 k_c 的增大而减小; 如当均压固结($k_c = 1$), $\sigma_{3c} = 400$ kPa 时, 破坏时的动孔压比 $u_{df}/\sigma'_m = 0.70$, 偏压固结($k_c = 2$)时, 破坏时的动孔压比 $u_{df}/\sigma'_m = 0.31$, 即达到破坏时试样产生的最大孔压比也随 k_c 增大而降低。

(4) 固结应力比 k_c 一定时, 固结围压 σ_{3c} 变化对 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系的影响很小(见图 2)。均压固结和偏压固结时, 不同固结围压 σ_{3c} 下 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系试验点分布在较窄的带内, 振次比 N/N_f 相同时, 发展的动孔压比 u_d/σ'_m 随固结围压 σ_{3c} 增大虽然有减小的趋势, 但是这种减小趋势很微弱, 可以近似认为 u_d/σ'_m 随固结围压 σ_{3c} 增大, 其基本上没有变化(见图 2)。在 $k_c = 1$ 时, 不同固结围压下破坏时动孔压比 $(u_d/\sigma'_m)_f$ 的平均值为 0.75; $k_c = 2$ 时, 破坏时动孔压比 $(u_d/\sigma'_m)_f$ 的平均值为 0.30, 动孔压远小于固结围压。由于均压固结下试样破坏时最大动孔压比已经基本上达到 90% 以上, 则可以认为均压固结时尾矿砂基本上可以产生液化, 而偏压固结时不会产生液化。

(5) 均压固结($k_c = 1$)时, 虽然尾矿砂的孔压增长曲线与 Seed 等提出的孔压模型具有相同的变化形态(见图 1, 2), 但当用 Seed 等提出的孔压模型^[7]:

$$u_d/\sigma'_m = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_f} \right)^{1/(2\theta)} \quad (1)$$

对尾矿砂的动孔压曲线进行拟合(见图 2(a))时, 可见, 当 $\theta = 1.10$, $u_d < 0.5$ 时, 拟合的结果与试验结果较为接近; 当 $u_d > 0.5$ 时, 拟合的结果与试验值有明显偏差, 造成这种偏差的主要原因是由于尾矿砂振动破坏时 $u_d \neq 1$ 所致。因此, 不能直接用 Seed 等提出的应力孔压模型来描述, 但对式(1)进行修正后, 仍可用类似于 Seed 应力孔压模型的表达式来描述, 其具体表达式为

$$u_d/\sigma'_m = \frac{4}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{2N_f} \right)^{1/(2\theta)} \quad (2)$$

式中： θ 为试验参数，动应力幅值、固结围压变化对 θ 的影响很小，均可近似地取为 1.10。

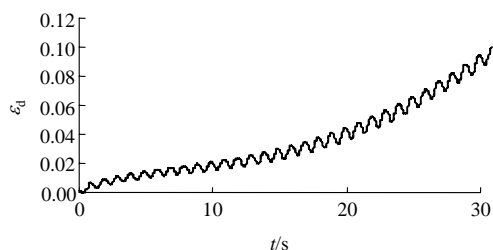
(6) 偏压固结($k_c = 2$)时，尾矿砂的孔压增长曲线与 Seed 等提出的孔压模型的变化形态完全不同(见图 1, 2)，因此不能用 Seed 等提出的孔压模型来描述，而可以用类似于 A 型曲线^[8]的表达式来拟合，其具体表达式为

$$u_d / \sigma'_m = 1 - e^{-\beta \frac{N}{N_f}} \quad (3)$$

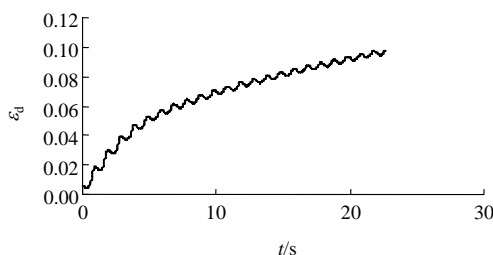
式中： β 为试验参数，动应力幅值、固结围压变化对 β 的影响较小，均可近似地取为 0.41。

3.2 残余应变特性

动应力作用下的残余应变是指动应力卸除后土体残留的应变值。在动三轴试验中通常取动应力 $\sigma_d = 0$ 时的应变作为残余应变。一般情况下，当饱和土试样在各向均等固结不排水条件下承受循环荷载作用时，轴向拉伸和压缩两个方向的应变振幅大体上呈对称发展，当动应力停止时，应变振幅即恢复为 0；当饱和试样处在非均等固结状态时，应变振幅随着动应力的循环作用而向压缩方向偏移^[9]。但是，从本文在均压和偏压固结条件下尾矿砂的动应变的典型时程曲线(见图 3)可以看出，即使在均压固结($k_c = 1$)条件下，应变振幅也是随着动应力的循环作用而逐渐地向压缩方向偏移。这种现象与张超等^[5]对饱和尾矿料和杨振茂等^[10, 11]对饱和黄土的研究结果相一致，说明对于饱和尾矿砂而言，无论



(a) $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}, k_c = 1$



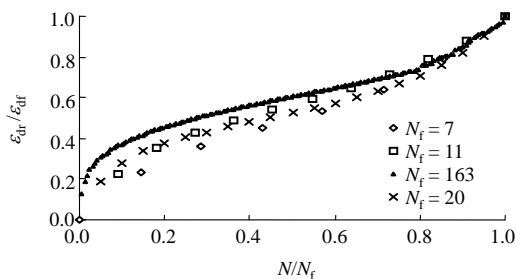
(b) $\sigma_{3c} = 200 \text{ kPa}, k_c = 2$

图 3 动应变时程曲线

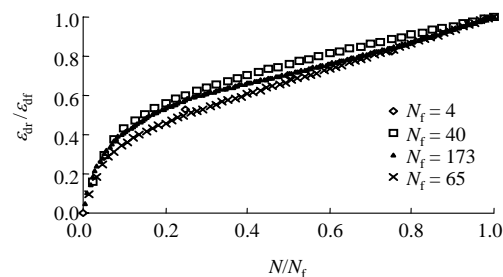
Fig.3 Time-history curves of dynamic axial strain

是均压固结还是偏压固结应力状态，随着振动历时的增长，轴向动应变均由弹性应变和塑性应变组成，即有残余变形产生。但是，均压固结与偏压固结时动应变时程曲线的形态却明显不同。均压固结时，曲线由振动初期的下凹形和振动后期的上凹形二段组成，即振动初期动应变增长较快，中期缓慢增长，后期急剧增长；偏压固结时，呈下凹形态，即振动初期动应变发展迅速，后期随着振动次数的增大动应变的增长速率趋于缓慢。

固结应力条件相同(一定的 σ_{3c} , k_c)时，不同动应力 $\sigma_d(N_f)$ 下饱和尾矿砂的轴向残余应变 ϵ_{dr} 和破坏时的轴向残余应变 ϵ_{df} 之比 $\epsilon_{dr}/\epsilon_{df}$ 与振次比 N/N_f 的典型关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知，固结应力条件相同时，不同动应力 $\sigma_d(N_f)$ 下 $\epsilon_{dr}/\epsilon_{df} - N/N_f$ 关系试验点分布在较窄的范围内，即表明动应力变化对 $\epsilon_{dr}/\epsilon_{df} - N/N_f$ 关系的影响很小，不同破坏振次下残余应变增长曲线具有较好的归一性。



(a) $\sigma_{3c} = 400 \text{ kPa}, k_c = 1$



(b) $\sigma_{3c} = 400 \text{ kPa}, k_c = 2$

图 4 不同动应力下残余应变比与振次比关系

Fig.4 Relationship between residual strain ratio and cyclic times ratio under different dynamic stresses

固结应力比 k_c 相同，固结围压 σ_{3c} 不同时，施加不同的动应力得到残余应变增长的 $\epsilon_{dr}/\epsilon_{df} - N/N_f$ 关系曲线示于图 5。由图 5 可知：

(1) 固结应力比相同时，不同固结围压下 $\epsilon_{dr}/\epsilon_{df} - N/N_f$ 关系的试验数据点分布在一个较窄的范围内，即固结围压变化对 $\epsilon_{dr}/\epsilon_{df} - N/N_f$ 关系的影响很小，不同固结围压下残余应变增长曲线可以近似地归一。

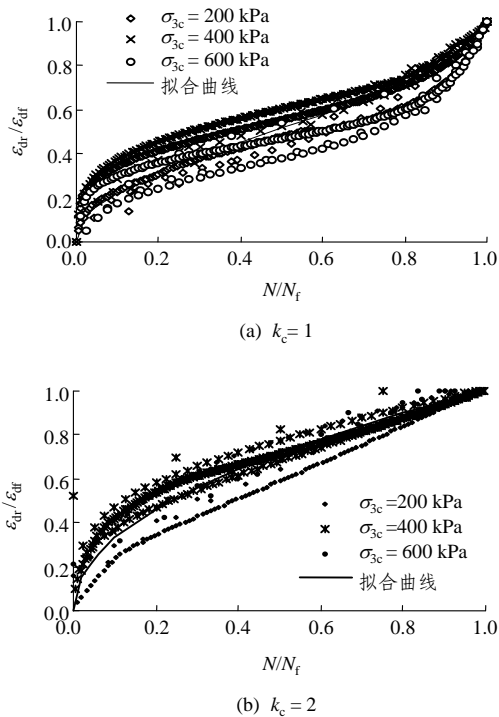


图5 不同固结围压下残余应变比与振次比关系
Fig.5 Relationship between residual strain ratio and cyclic times ratio under different confining pressures

(2) 均压固结($k_c = 1$)时,在振动荷载作用的初期阶段,残余应变比 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df}$ 随振次比 N/N_f 的增大而快速增大,当振次比 $N/N_f = 0.2$ 时,则残余应变比 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} = 0.4$,其后,残余应变比 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df}$ 发展的速率逐渐减小;当振次比 $N/N_f > 0.6$ 时,残余应变比 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df}$ 增长的速率又随着振次比的增大而趋于增大;残余应变的这种发展特性使 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} - N/N_f$ 关系曲线由振次比 $N/N_f \leq 0.6$ 时的下凹段和大于 0.6 时的上凹段两段组成, $N/N_f = 0.6$ 为曲线上的反弯点,它可作为两个发展阶段的分界点。残余应变的这种发展特性与 Seed 等人提出的孔压的应力模型曲线形态相似,可用类似于式(1)的函数表达式来描述尾矿砂的残余应变特性,其具体表达式为

$$\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_f}\right)^{1/(2\alpha)} \quad (4)$$

式中: α 为试验参数,动应力幅值、固结围压变化对 α 的影响较小,均可近似地取为 2.15。由此可知,虽然残余应变的发展特性可用类似于 Seed 孔压的应力模型来描述,但其试验参数(2.15)比孔压模型试验参数(0.70)要大得多。

(3) 偏压固结($k_c = 2$)时,残余应变比 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df}$ 随振次比 N/N_f 的增大而呈增大的趋势,且当振次比

$N/N_f < 0.2$ 时,残余应变的增长速率较大,其后,随振次比 N/N_f 增大而逐渐减小,残余应变的这种发展特性使 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} - N/N_f$ 关系曲线呈下凹形态。可用幂函数关系对不同固结围压下尾矿砂的 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} - N/N_f$ 关系曲线进行较好地拟合(见图 5),其表达式为

$$\frac{\varepsilon_{dr}}{\varepsilon_{df}} = \left(\frac{N}{N_f}\right)^b \quad (5)$$

式中: b 为试验参数,动应力幅值、固结围压变化对 b 的影响较小,均可近似地取为 0.48。

4 结 论

(1) 固结应力条件相同(一定的 σ_{3c} , k_c)时,动应力 σ_d 变化对尾矿砂的孔压增长 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系曲线基本上没有影响;固结围压 σ_{3c} 相同时,固结应力比 k_c 变化对其有较明显的影响;固结应力比 k_c 一定时,固结围压 σ_{3c} 变化对 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系的影响很小。

(2) 不同固结应力条件下,饱和尾矿砂的孔压增长曲线不能直接用 Seed 应力孔压模型来模拟,且均压固结和偏压固结时 $u_d/\sigma'_m - N/N_f$ 关系曲线形态不同。均压固结($k_c = 1$)时,可用修正后的 Seed 应力孔压模型表达式来描述;偏压固结($k_c = 2$)时,可用指数函数来模拟。固结围压、动应力幅值变化对二个模型参数值的影响很小,均可分别取同样的值。

(3) 饱和尾矿砂在均压固结和偏压固结条件下均产生较大的残余应变。固结围压 σ_{3c} 、动应力 σ_d 变化对残余应变增长 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} - N/N_f$ 关系曲线基本上没有影响,固结应力比对其有明显的影。

(4) 残余应变增长 $\varepsilon_{dr}/\varepsilon_{df} - N/N_f$ 关系曲线在均压固结和偏压固结时分别具有明显不同的形态。均压固结($k_c = 1$)时,可用类似于 Seed 应力孔压模型的反正弦函数表达式来描述;偏压固结($k_c = 2$)时,可用幂函数来模拟。固结围压、动应力幅值变化对二个模型参数值的影响很小,均可分别取同样的值。

参考文献(References):

[1] 阎金安, 王武林. 尾矿砂的动力特性研究[J]. 岩土力学, 1990, 11(4): 69 - 74. (Yan Jin'an, Wang Wulin. Study on dynamic properties of tailings sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 1990, 11(4): 69 - 74. (in Chinese))
[2] 辛鸿博, 王余庆. 大石河尾矿黏性土的动力变形和强度特征[J]. 水

- 利学报, 1995, (11): 56 - 62.(Xin Hongbo, Wang Yuqing. Cyclic deformation and strength of Dashihe Mine slimes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (11): 56 - 62.(in Chinese))
- [3] 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, 2004, (4): 24 - 29.(Ruan Yuancheng, Guo Xin. Experimental study on dynamic deformation properties of saturated tailings material[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (4): 24 - 29.(in Chinese))
- [4] 阮元成, 郭新. 饱和尾矿料静、动强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (1): 67 - 73.(Ruan Yuancheng, Guo Xin. Experimental study on static and dynamic strength properties of saturated tailings[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (1): 67 - 73.(in Chinese))
- [5] 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 Chunhe, Bai Shiwei. Experimental study on dynamic characteristics of tailings material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 35 - 40.(in Chinese))
- [6] 中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验规程(SL237 - 1999)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Geotechnical Testing Regulation Specification of Soil Test(SL237 - 1999)[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [7] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.(Xie Dingyi. Soil Dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.(in Chinese))
- [8] 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): 28 - 32.(Zhang Jianmin, Xie Dingyi. Practical calculation of dynamic pore water pressure in saturated[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, (8): 28 - 32.(in Chinese))
- [9] 郁寿松, 石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 35 - 44.(Yu Shousong, Shi Zhaoji. Experimental investigation of soil settlement due to earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 35 - 44.(in Chinese))
- [10] 杨振茂, 赵成刚, 王兰民. 饱和黄土液化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 864 - 871.(Yang Zhenmao, Zhao Chenggang, Wang Lanmin. Testing study on saturated loess liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 864 - 871.(in Chinese))
- [11] 李兰. 饱和黄土动力特性的几点探讨[A]. 见: 第五届全国土动力学学术会议论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998. 138 - 143.(Li Lan. Discussions on the dynamic characteristics of saturated loess[A]. In: Proc. of the 5th National Conference on Soil Dynamics of China[C]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1998. 138 - 143.(in Chinese))