

饱和尾矿粉土动力特性试验研究^①

谭 凡^{1,2}, 饶锡保^{1,2}, 黄斌^{1,2}, 王占彬^{1,2}, 徐言勇^{1,2}

(1. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部岩土力学与工程重点试验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:通过动三轴试验研究某尾矿粉土的动强度特性与孔压特性, 试验在围压 100、200 和 300 kPa 与固结比 1.0 和 2.0 条件下进行。结果表明:(1)在循环荷载作用下, 等压固结时饱和尾矿粉土全部液化; 偏压固结时饱和尾矿粉土未发生液化;(2)各向等压固结时, 选取双幅动应变达到 5% 作为破坏标准; 偏压固结时, 选取总应变达到 5% 作为破坏标准;(3)围压越大, τ_d/σ'_0-N_f 曲线越高, 动剪应力比 τ_d/σ'_0 与破坏振次 N_f 在对数坐标图上表现出良好的线性关系, 可以采用对数函数来拟合 τ_d/σ'_0-N_f 关系曲线;(4)固结应力条件相同时, 动应力 σ_d 变化对尾中砂的孔压增长 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线基本上没有影响; 固结应力比 K_c 一定时, 固结围压 σ_3 越大, $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线越高;(5)尾矿粉土孔压发展模式在等压固结和偏压固结时不同, 固结比 $K_c=1.0$ 时, 可采用幂函数表达式来描述尾粉土孔压发展; 固结比 $K_c=2.0$ 时, 可用对数函数来模拟其发展。

关键词: 尾矿粉土; 动力特性; 动强度; 动孔压

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0772-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0772

Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Tailings Silts

TAN Fan^{1,2}, RAO Xi-bao^{1,2}, HUANG Bin^{1,2}, WANG Zhan-bin^{1,2}, XU Yan-yong^{1,2}

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: Based on dynamic triaxial tests conducted on tailings silts under different consolidation conditions, the dynamic strength, and developing characteristics of dynamic pore water pressure of tailings silts were studied. The cell pressures used were 100, 200, and 300 kPa, and the consolidation ratios were 1.0 and 2.0. The results indicated that saturated tailings silts underwent liquefaction under isotropic consolidation conditions and did not experience liquefaction under anisotropic consolidation conditions. The failure criterion under the isotropic consolidation condition was the 5% double amplitude strain condition, and the criterion under the anisotropic consolidation condition was the 5% total strain condition. Under the same consolidation ratio, the relationship of τ_d/σ'_0 and N_f of different cell pressures could not be normalized. The relationship of τ_d/σ'_0 and N_f could be described by a logarithmic function. Under the same consolidation condition, the relationship of $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ was the same. Under the same consolidation ratio, the cell pressures had a certain influence on the relationship of $u_d/\sigma'_0-N/N_f$. When the consolidation ratio was $K_c=1.0$, the pore pressure developed characteristics that could be described by a power function, and the pore pressure developed characteristics under $K_c=2.0$ that could be described by a logarithmic function.

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51309027)

作者简介: 谭 凡(1986—), 男, 硕士, 主要从事土动力学等方面的研究。E-mail: 664313174@qq.com。

Key words: tailings silts; dynamic characteristics; dynamic strength; dynamic pore pressure

0 引言

尾矿是由金属或非金属矿山开采出的矿石,经选矿厂选出有价值的精矿后产生的像细砂或粉土一样的细粒“废渣”,而尾矿库是矿业为堆存尾矿所修建的构筑物系统^[1]。尾矿坝是尾矿库的主要构筑物,我国许多尾矿坝位于地震高烈度区,地震时易产生液化。以往地震引起尾矿库的液化、裂缝以及沉降等问题时有发生,其中以上游尾矿坝的震害较多。因此,现在在地震高烈度地区新建尾矿坝和现有尾矿坝加高的设计时皆需要对其动力稳定性进行分析,尾矿料的动力特性试验研究具有十分重要的实际意义。

尾矿材料与一般土体材料不同,它们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^[2]。尾矿料按其粒径组成可分为砂性尾矿、粉性尾矿和黏性尾矿。粉性尾矿(即尾粉土)是指粒径小于 0.075 mm,颗粒质量不超过总质量的 50%,且塑性指数不大于 10 的尾矿料^[3]。目前关于尾矿材料的研究主要集中在砂性尾矿^[4-9],而同样作为尾矿坝筑坝材料的尾矿粉土^[10],其动力特性试验研究成果却较少。樊鹏斐^[1]通过动三轴试验研究了尾矿粉土的动力力学特性,获得了在动力条件下细粒尾矿土的变形破坏规律和动力力学特性指标及其相互关系;张超^[6-7]研究了尾矿粉土的动力变形特性和动强度特性。尾粉土的土质特性与砂土不同,特别是颗粒组成和孔隙中薄膜水的物理化学作用,其动力特性与砂土有明显差异,动强度及动荷载作用过程中孔隙水压力的增长模式与尾砂土也有很大差别。本文拟通过对尾矿粉土进行不同初始应力状态下的动强度试验,确定尾矿粉土的动强度破坏标准,得到细粒尾矿土的动强度特性及孔压发展规律,以期尾矿坝设计时进行抗震稳定性计算分析提供科学依据。

1 试验试样和设备

试验所用尾矿料取于某一尾矿库。土料比重为 2.89,塑性指数为 8.9。试验试样尺寸为 $\varphi 39.1 \text{ mm} \times H 80 \text{ mm}$,采用击实法制备,制样干密度为 1.70 g/cm^3 ,试样分三层击实,单层击实达到试验密度后

对层面进行刨毛,再进行下一层击实。采用抽气饱和和结合反压饱和的方法,对饱和试样的孔隙水压力系数 B 值进行检验,达 0.95 以上后进行试验。

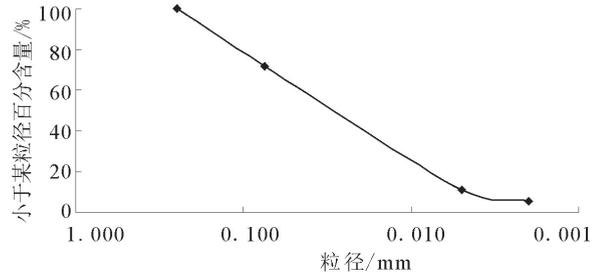


图 1 尾矿粉土级配曲线

Fig.1 Grading curve of tailing silts

动力试验采用英国 GDS 全自动多功能动三轴仪,如图 2 所示。设备循环荷载激振频率为 0~5 Hz,动荷载波形可选择正弦波、三角波和自定义波形进行试验,本次试验采用正弦波。



图 2 英国 GDS 动三轴试验仪器

Fig.2 The GDS dynamic triaxial testing instrument

2 试验方案

本次动力试验采用等压固结和偏压固结研究不同应力状态条件下的尾矿粉土的动力特性。试验固结应力比 K_c 选取 1.0 和 2.0,每个固结应力比下围压为 100、200 和 300 kPa,每个应力状态选取 3~4 个不同的动应力进行试验。试样饱和完成后在一定的应力状态下进行固结,固结完成后在不排水条件下施加一定的动应力进行试验。

3 试验结果

3.1 尾矿粉土动力试验基本特性

尾矿粉土在动荷载作用下的应变和孔压发展受固结比影响较大。固结比为 1.0 时,随着动荷载的作用,孔压逐渐上升,并最终达到周围压力;总应变在开

始阶段增长较慢,当孔压上升到0.8~0.9倍 σ_3 时总应变快速增长;试样双幅应变与振次关系曲线呈S型,随着动荷载的作用,双幅应变快速增长,当孔压到达围压值后双幅应变值基本保持不变(图3)。

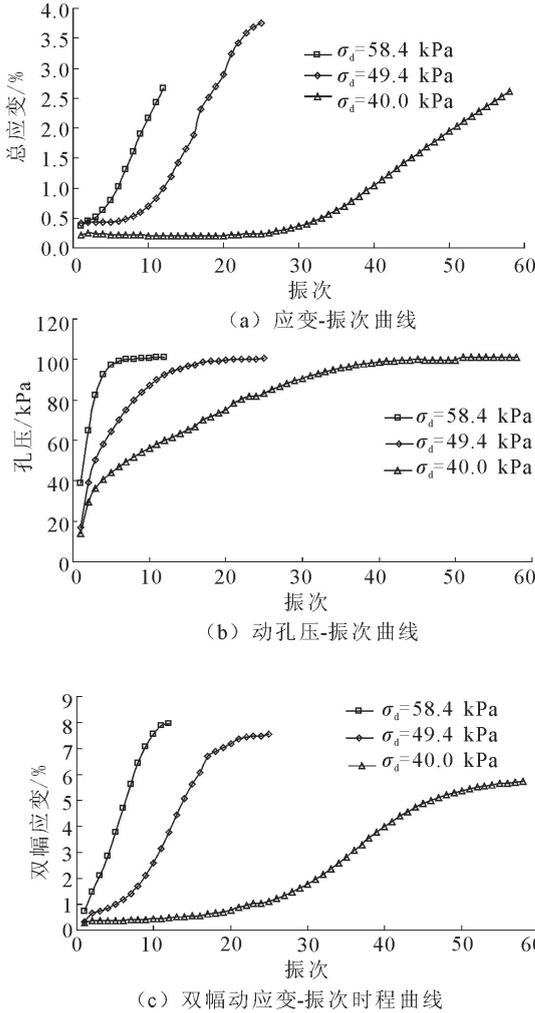


图3 尾矿粉土动力试验曲线 ($\sigma_3=100$ kPa, $K_c=1.0$)

Fig.3 Dynamic tests curves of tailing silts ($\sigma_3=100$ kPa, $K_c=1.0$)

偏压固结时,在荷载作用的初始阶段,孔压逐渐上升,并最终趋于一个小于围压的稳定值。相同固结条件下,循环动荷载越大,孔压稳定值越大,偏压固结条件下孔压稳定值约为0.5~0.8 σ_3 ;试样总应变随着动荷载作用呈直线增长;双幅动应变发展模式与孔压曲线较为相似,随着试样孔压的提高,土样有效应力降低,动模量减小,双幅动应变增大,最终趋于稳定(图4)。

3.2 尾矿粉土动强度破坏准则

动强度是一定振次作用下达到某一破坏标准时所需的动应力,动强度试验中,合理地确定破坏标准是试验和成果整理的基础。目前动强度试验破坏标

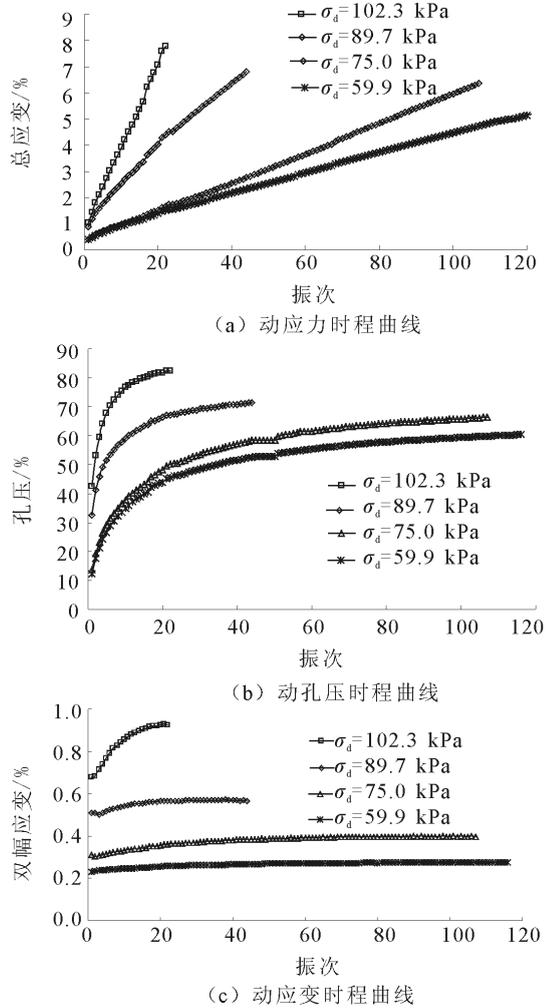


图4 尾矿粉土动力试验时程曲线($\sigma_3=100$ kPa, $K_c=2.0$)

Fig.4 Time-history curves of tailing silts in dynamic tests ($\sigma_3=100$ kPa, $K_c=2.0$)

准主要包括孔压标准与应变标准,孔压标准是土样累积孔隙水压等于围压即可判为发生破坏,但由于粉土孔压发展具有延迟,孔压标准在实际操作中很难实现;在周期荷载作用下,粉土孔隙水压的上升必然会导致有效应力的下降,从而使抗剪强度降低。以双幅应变或总应变达到某一值作为破坏标准称为应变标准,但在实际操作中破坏应变也需要通过分析成果合理选取。为了合理确定尾矿粉土的破坏准则,整理了各向等压固结条件下双幅动应变与孔压比的关系曲线(图5)和偏压固结条件下的总应变与孔压比的关系曲线(图6)。在各向等压条件下孔压比与双幅动应变关系曲线存在比较明显的拐点,开始阶段孔压随着双幅应变增大快速增长,达到拐点后孔压增长缓慢,拐点双幅应变值为1.0%~3.0%;当双幅动应变达到3.0%~5.0%时,孔压基本稳定;双

幅总应变达到 5.0% 时孔压比范围值为 0.95~1.0。偏压固结下,当总应变达到 5% 后孔压趋于稳定,增长较小。

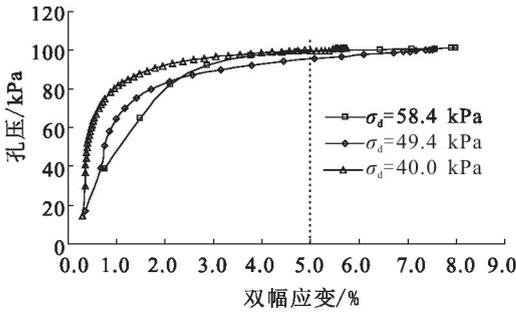


图 5 双幅应变-孔压关系曲线 ($\sigma_3 = 100 \text{ kPa}, K_c = 1.0$)

Fig.5 Double amplitude strain-pore pressure relationship curves ($\sigma_3 = 100 \text{ kPa}, K_c = 1.0$)

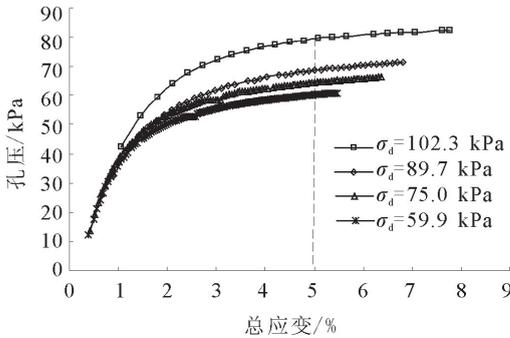


图 6 总应变-孔压关系曲线 ($\sigma_3 = 100 \text{ kPa}, K_c = 2.0$)

Fig.6 Total strain-pore pressure relationship curves ($\sigma_3 = 100 \text{ kPa}, K_c = 2.0$)

根据对试验成果的分析,本次试验破坏标准为:固结比为 1.0 时,当双幅应变达到 5% 时,孔压基本稳定,且孔压比大于 0.95,取双幅应变达到 5% 作为破坏标准;偏压固结时,总应变值达到 5% 时孔压基本稳定,取总应变达到 5% 作为破坏标准。

3.3 尾矿粉土动强度特性

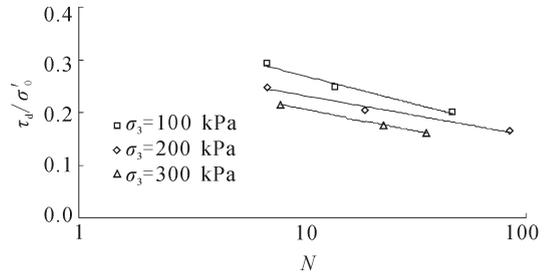
根据试验结果,绘制动剪应力比 τ_d/σ'_0 与振次 N_f 的关系曲线(图 7)。固结应力比相同时,围压对尾粉土的 τ_d/σ'_0-N_f 影响较大,围压越大, τ_d/σ'_0-N_f 越高。动剪应力比 τ_d/σ'_0 与 N_f 在对数坐标图上表现出良好的线性关系,可以采用如下对数函数式来表示:

$$\tau_d/\sigma'_0 = A - B \ln(N_f) \quad (1)$$

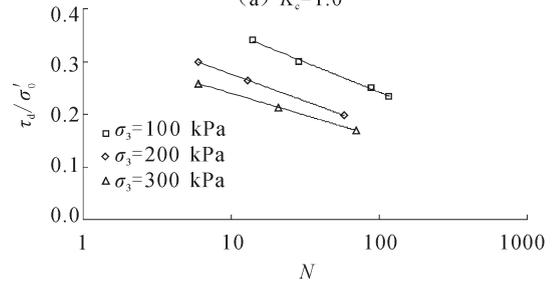
式中:A、B 为测定的参数。

3.4 尾矿粉土动孔压特性

尾矿粉土动荷载作用下的孔压比 u_d/σ'_0 与振次比 N/N_f 的典型关系曲线见图 8。试验结果表明:(1) 固结应力比 K_c 一定时,固结围压 σ_3 变化对 u_d/σ'_0



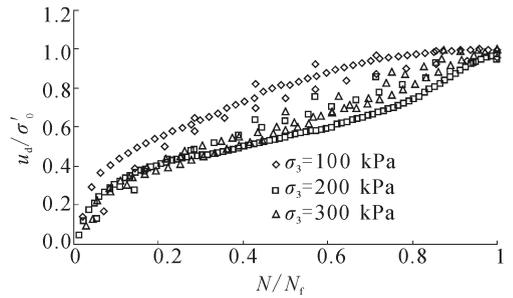
(a) $K_c = 1.0$



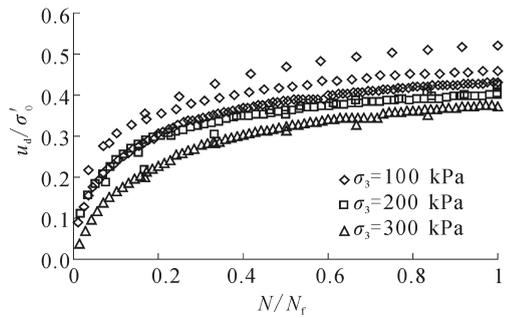
(b) $K_c = 2.0$

图 7 破坏振次与动剪应力比曲线

Fig.6 τ_d/σ'_0-N_f curves



(a) $K_c = 1.0$



(b) $K_c = 2.0$

图 8 动孔压比与振次比关系曲线

Fig.8 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ curves

σ'_0 与振次比 N/N_f 关系存在一定的影响。不同围压条件下, $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线存在一定的差异,总体表现为 N/N_f 一定时,围压越大, u_d/σ'_0 越大。各向等压固结时,土样破坏时动孔压比 u_d/σ'_0 的范围为 0.95~1.00,动孔压基本等于固结围压;偏压固结时,试样破坏时孔压比范围为 0.3~0.5。均压固结下试样破坏时最大动孔压比已经基本上达到 95% 以上,则可以认为均压固结时尾矿粉土基本上

可以产生液化,而偏压固结时不会产生液化。(2)固结应力条件相同时,动应力 σ_d 变化对 u_d/σ'_0 与振次比 N/N_f 关系基本上没有影响。动应力 σ_d 不同时, $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线分布范围较窄,即动应力 σ_d 变化对 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系的影响相对较小,不同动应力 σ_d 下 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线可近似地归一。

各向等压固结时,分别采用 Seed 孔压模型与幂函数描述尾粉土的动孔压发展。Seed 各向等压孔压模型^[11]公式为:

$$u_d/\sigma'_0 = 2/\pi * \arcsin(N/N_f)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (2)$$

式中: θ 为试验参数,大多数情况下取 0.7^[11],本次试验取 2.0 拟合效果最好。对比试验点与拟合曲线(图 9),Seed 模型在孔压比大于 0.5 后拟合效果较差,孔压的发展模式与幂函数较为接近,采用幂函数拟合效果相对于 Seed 模型较好。幂函数公式为:

$$u_d/\sigma'_0 = A (N/N_f)^B \quad (3)$$

式中: A 、 B 为试验参数,本文中 A 、 B 分别取 0.975 与 0.522。

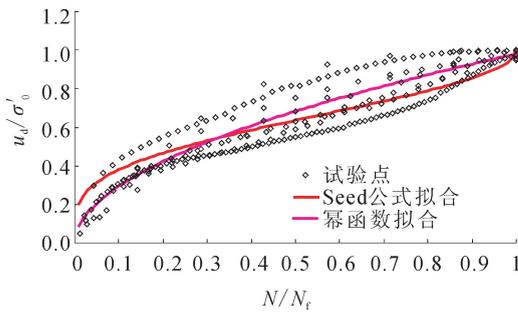


图 9 Seed 公式与幂函数拟合动孔压比与振次比关系曲线

Fig.9 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ curves fitted by Seed formula and power function

当固结比 $K_c=2.0$ 时, $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线形态与 Seed 孔压模型差别较大。在对数坐标上绘制 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线,表现出良好的线性关系(图 10)。采用对数函数来进行拟合,具体公式为:

$$u_d/\sigma'_0 = A + B \ln(N/N_f) \quad (4)$$

式中: A 、 B 为试验参数,本文中 $A=0.422$, $B=0.083$ 。

4 结论与建议

通过对饱和尾矿粉土进行动力试验,研究尾矿粉土的动强度与动孔压特性。结论与建议如下:

(1) 在循环荷载作用下,等压固结时饱和尾矿粉土基本上全部液化;偏压固结时饱和尾矿粉土未发生液化。

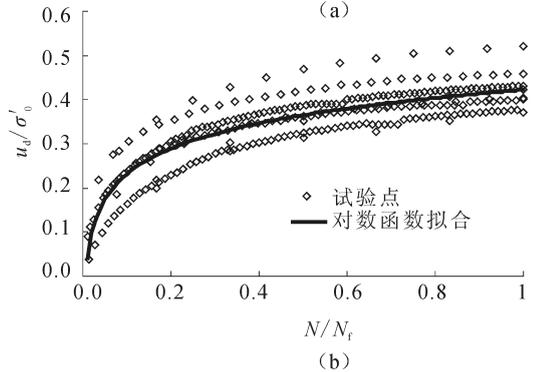
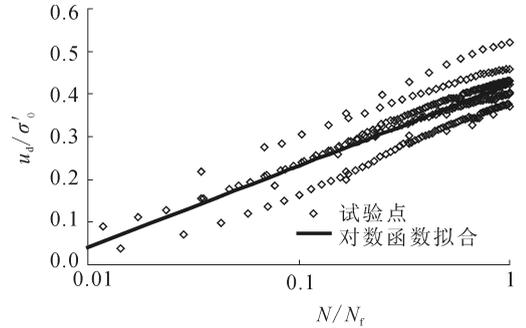


图 10 对数函数拟合动孔压比与振次比关系曲线
Fig.10 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ curves fitted by logarithmic function

(2) 各向等压时,当尾矿粉土双幅动应变达到 5% 时,孔压已经稳定,且基本达到围压值,选取双幅动应变达到 5% 作为破坏标准;偏压固结时,当总应变达到 5% 时尾粉土孔压基本稳定,选取总应变达到 5% 作为破坏标准。

(3) 围压越大, τ_d/σ'_0-N_f 曲线越高,动剪应力比 τ_d/σ'_0 与 N_f 在对数坐标图上表现出良好的线性关系,可以采用对数函数来拟合 τ_d/σ'_0-N_f 关系曲线。

(4) 固结应力条件相同时,动应力 σ_d 变化对尾中砂的孔压增长 $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线基本上没有影响;固结应力比 K_c 一定时,固结围压 σ_3 越大, $u_d/\sigma'_0-N/N_f$ 关系曲线越高。

(5) 尾粉土孔压发展模式在等压固结和偏压固结时不同,固结比 $K_c=1.0$ 时,可采用幂函数表达式来描述尾粉土孔压发展;固结比 $K_c=2.0$ 时,可用对数函数来模拟尾粉土孔压发展。

参考文献(References)

- [1] 樊鹏斐. 细粒尾矿土的动力特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
FAN Peng-fei. Study on Test of the Dynamic Properties About the Fine-grained Tailings Soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [2] 张超. 尾矿动力特性及坝体稳定性分析[D]. 武汉: 中国科学院

- 武汉岩土力学研究所,2005.
- ZHANG Chao.Dynamic Properties of Tailings and the Stability Analysis of Tailings Dam[D].Wuhan:Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.(in Chinese)
- [3] 中国有色金属工业协会.尾矿堆积坝岩土工程技术规范(GB50547-20107)[S].北京:中国计划出版社,2010.
- China Nonferrous Metals Industry Association.Technical code for Geotechnical Engineering of Tailings Embankments[S]. Beijing:Standars Press of China,2010.(in Chinese)
- [4] 陈存礼,何军芳,胡再强,等.尾矿砂的动力变形及动强度特性研究[J].水利学报,2007,38(3):365-370.
- CHEN Cun-li,HE Jun-fang,HU Zai-qiang,et al.Experimental Study on Dynamic Deformation and Dynamic Strength of Tailoring Sands[J].Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(3):365-370.(in Chinese)
- [5] 陈存礼,何军芳,胡再强,等.动荷载作用下饱和尾矿砂的孔压和残余变形演化特性[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):4034-4039.
- CHEN Cun-li,HE Jun-fang,HU Zai-qiang,et al.Developing Charactreistics of Pore Water Pressure and Residual Deformation of Tailings Sands under Cyclic Load[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineereing,2006,25(Supp2):4034-4039.(in Chinese)
- [6] 张超,杨春和.细粒含量对尾矿材料液化特性的影响[J].岩土力学,2006,27(7):1133-1138.
- ZHANG Chao,YANG Chun-he.Effect of Fines Content on Liquefaction Properties of Tailings Material[J].Rock and Mechaincs,2006,27(7):1133-1138.(in Chinese)
- [7] 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 Charactristics of Tailings Materiall[J].Rock and Mechaincs,2006,27(1):35-40.(in Chinese)
- [8] 贺汇文,龙建辉,吕远强.米箭沟尾矿坝料动力特性试验研究[J].工程地质学报,2007,15(6):817-822.
- HE Hui-wen,LONG Jian-hui,LY Yuan-qiang.Experimental Study on Dynamic Characteristics of Tailing Material at Mijianguou Dam[J].Journal of Engineering Geology,2007,15(6):817-822.(in Chinese)
- [9] 余果,杨作亚,尹光志,等.羊拉铜矿尾矿料动力特性试验研究[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6):107-110.
- YU Guo,YANG Zuo-ya,YIN Zhi-guang,et al.Dynamic Properties of Yangla Copper Tailings Material[J].Journal of Chongqing Jianzhu University,2008,30(6):107-110.(in Chinese)
- [10] 沃廷枢.尾矿库手册[M].北京:冶金工业出版社,2013.
- WO Ting-shu.Tailings Handbook[M].Beijing:Metallurgical Industry Press,2013.(in Chinese)
- [11] 谢定义.土动力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
- XIE Ding-yi.Soil Dynamics[M].Beijing:Higher Education Press,2011.(in Chinese)