

文章编号: 1000-7598-(2006) 01-0035-06

尾矿料的动力特性试验研究

张 超, 杨春和, 白世伟

(中国科学院 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 通过对某铜矿的尾矿料进行动三轴和共振柱试验, 研究了尾矿材料动力变形特性, 提出了简单实用的孔隙水压力模型, 给出了能更加准确地预测尾矿材料的动孔隙水压力的公式, 并将其与 Seed 提出的预测公式进行了比较。在不同密度尾矿料的动三轴试验基础上, 分析了相对密度对液化特性的影响, 得出了相对密度小于 70 % 时抗液化强度随相对密度的增加而明显增加的结论。在不同围压下进行动三轴试验, 结果表明: 在相同的液化振次条件下, 围压越高, 动剪应力比越低。由共振柱试验可知, 尾矿料的阻尼比随着动剪应变幅的增大而增大, 而动剪模量随动剪应变幅的增大而减小, 动剪模量和阻尼比与动剪应变幅的关系受围压影响不太敏感。

关 键 词: 尾矿料; 动力特性; 孔隙水压力模型; 相对密度; 尾矿坝

中图分类号: TD 315

文献标识码: A

Experimental study on dynamic characteristics of tailings material

ZHANG Chao, YANG Chun-he, BAI Shi-wei

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Through the dynamic triaxial tests and the resonant column apparatus tests of the tailings material taken from a copper mine, the dynamic deformation properties are studied. From the experiment results, a practical strain pore-water pressure model is given and a formula to forecast the dynamic pore-water pressure is presented. Compared with Seed's forecast formula, the formula can forecast the dynamic pore-water pressure of saturated tailings material more precisely. Based on the effect of different relative density on liquefaction property of tailings material, a conclusion is drawn that the liquefaction strength will obviously increase with the increase of relative density before the relative density is less than 70%. From the dynamic triaxial tests with different confining pressures, it is found that the dynamic shear stress ratio is less while the confining pressure is more in the condition of the same vibration times. Through the resonant column apparatus tests, it can be found that the damping ratio will increase with the dynamic shear strain increases, while dynamic shear modulus will decrease at the same time. And another conclusion that the relationship between dynamic shear modulus and damping ratio with dynamic shear strain is not sensitive to the confining pressure can be drawn.

Key words: tailings material; dynamic properties; pore-water pressure model; relative density; tailings dam

1 引 言

据统计, 我国冶金矿山现有尾矿坝近 400 座, 大多采用上游法筑坝工艺^[1]。S.G. Vick 指出^[2]: “迄今所报道的所有在地震中发生流动破坏的尾矿坝都是用上游法建造的”。这些尾矿坝中的尾矿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^[3]。国外对在强震区以上游法修筑尾

矿坝表示怀疑, 从稳定性考虑, 大型尾矿坝最好不要采用上游法^[1]。而国内的尾矿坝大多是采用上游法修筑的, 且其中很多都是高尾矿坝, 地震时易产生液化, 因此, 研究我国尾矿坝的抗震稳定性就显得尤为紧迫和必要。

对于尾矿砂的静力特性已有许多学者进行了较为深入的研究^[4-6], 而对尾矿材料的动力特性研究近年来才开始进行, 阎金安、王武林对银山铅锌矿的尾矿砂的动本构模型和动强度等进行过一些探讨^[7]; 辛鸿博、王余庆等人对首钢大石河尾矿坝的

铁矿尾矿砂及尾矿粘性土的动力特性和尾矿坝的地震安全性进行过一系列研究,分析了尾矿砂和尾矿粘性土的动力变形特性,粘粒含量和塑性指数对动剪应力幅的衰减速率的影响,指出了塑性指数对尾矿粘性土的动强度和动孔压的影响,研究了固结压力和平均粒径对动剪切模量的影响等^[6,8,9];阮元成、郭新也对铁矿的尾矿料进行了一些研究,指出了传统上认为粘性土尾矿泥是低粘性及其易液化性,初步分析了固结比对尾矿材料的动力特性的影响,并研究了尾矿砂和尾矿泥的动力残余变形等特性^[3]。笔者本次对尾矿料的研究侧重点在于相对密度对尾矿材料的动力特性的影响,过去的试验一般都是考虑尾矿材料实际的密度的试验,没有考虑尾矿材料的密度变化对其动力特性的影响。且不同种类矿山的尾矿料在矿物成分和生产工艺以及颗粒分布上有很大的差别,本试验尾矿样取自某铜矿尾矿库,而国内外对铜矿尾矿料的研究则相对较少。

笔者研究了尾矿料在循环加荷条件下的动力特性,为铜矿尾矿坝的建造、闭库设计和废弃尾矿库的开发利用提供科学依据,并可作为其他尾矿坝参考。

2 试验设备与制样

动力三轴试验采用 S-3-D 型液压式动三轴仪,试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$,循环荷载激振频率选用 1 Hz,试验激振波形采用正弦波。尾矿料的动剪模量和阻尼比试验是在 DTC-158 型共振柱仪上进行的。该仪器为底端固定、上端附有质量块的弹簧阻尼系统。该仪器可测试的剪应变幅范围为 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$,试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。动三轴仪和共振柱试验设备如图 1、图 2 所示。



图 1 S3D 中型动三轴仪

Fig.1 S3D medium-sized cyclic triaxial equipment



图 2 DTC-158 型共振柱仪

Fig.2 DTC-158 resonant column apparatus

将尾矿料洗盐后烘干,其颗分结果见图 3。由颗分曲线可知,尾矿料基本不含大于 1 mm 粒径的颗粒,小于 0.005 mm 的粒径含量小于 2%,该尾矿料是尾矿坝的主要成分。尾矿料的比重为 2.92。

尾矿料动三轴试验与共振柱试验的原理和方法参见文献[10]。试验采用干装法,控制干密度,装好干样后进行真空抽气,然后由底部通入脱气水进行饱和,使孔隙水压力系数 B 值达到 0.97 以上。饱和后,在一定的固结应力条件下排水固结,然后施加不同的动应力进行试验。

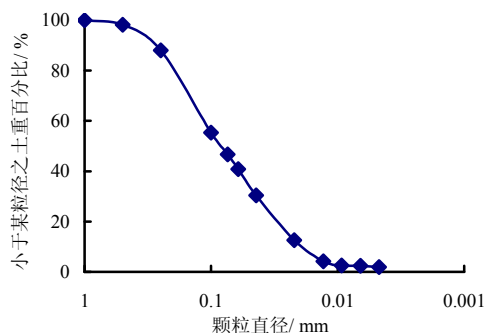


图 3 尾矿料的颗粒分析结果曲线

Fig.3 The grain-size analysis result of tailings material

3 试验结果

3.1 尾矿料动三轴试验基本特性

对饱和尾矿料进行动三轴试验,其中 $\sigma'_1 = \sigma'_3$ 分别取 100 kPa, 400 kPa, 采用孔隙水压达到围压作为破坏控制标准。试验得到的典型孔压、轴向压力与轴向应变的时程曲线如图 4 所示。图 4(c)为动荷载的曲线图。从图 4(a)可知,孔压随着动荷载的波动而波动,且孔压的最大值随着动荷载的作用时间不断增大,由于试验材料为尾矿材料,所以孔压增大直到液化。而图 4(b)给出的是轴向应变-时间曲

线,轴向应变在动荷载刚开始施加的很长一段时间都很小,直到动孔压增大到较高值,轴向应变才开始显著增大,一般在此以后几个动循环将会使试验材料发生液化或是破坏。

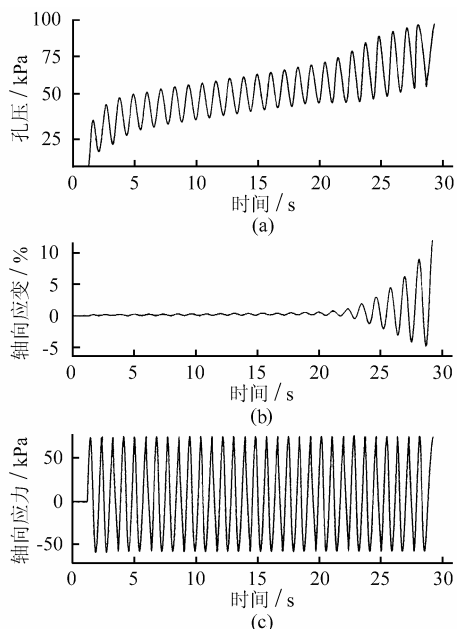


图4 典型动三轴试验曲线

Fig.4 Classic curve of dynamic triaxial test

在固结比为1,围压为100 kPa,动剪应力比为0.302的条件下,得到的试验结果如图5~7所示。其他尾矿样的试验曲线与此类似,不再赘述。

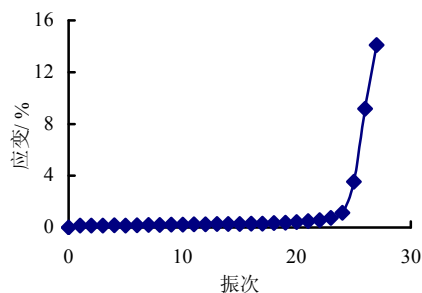


图5 振次-应变曲线

Fig.5 Vibration times-strain responses

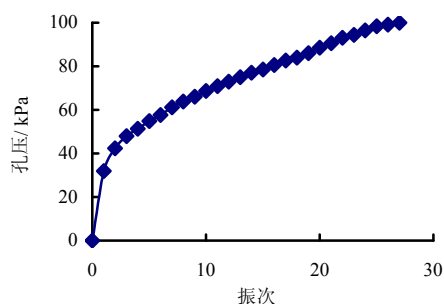


图6 振次-孔压曲线

Fig.6 Vibration times-pore pressure responses

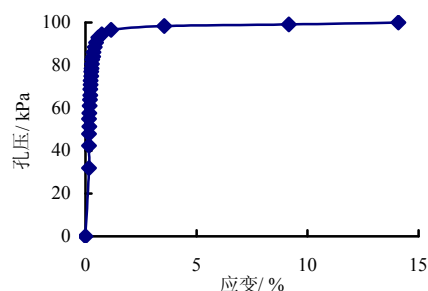


图7 应变-孔压关系曲线

Fig.7 Pore pressure-strain relation curve

由图5~7可知,在应变超过1%时,开始进入大变形阶段,此时孔隙水压力已经累积到一定量,液化指数已经接近于1,此时的孔压和应变接近塑性关系。从试验结果来看,无论密度还是围压和动应力的改变,该类尾矿料基本上都有这种趋势,因此可以将其变形过程分为两个阶段,第1阶段是应变小于1%时,此时应变随着振次的增加而缓慢的呈线性增长,而孔隙水压力则增长很明显,在动应变到1%时,孔压也接近围压,此时进入第2阶段;在这个阶段动应变大于1%时,孔隙水压力缓慢接近围压,直到等于围压而完全液化,此过程中,应变开始明显增加,且与振次呈线性关系增长。

3.2 简单的孔压应变模型

从图7可以发现,孔压与应变关系,可用双曲线方程来表示:

$$u = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

式中 u 为动孔隙水压力; ε 为应变; a, b 均为双曲线参数。

式(1)可以改写为如下形式:

$$\frac{\varepsilon}{u} = a + b\varepsilon \quad (2)$$

将图7的纵坐标变为 ε/u , 横坐标 ε 不变, 则图7的曲线将变成图8所示的直线形式。

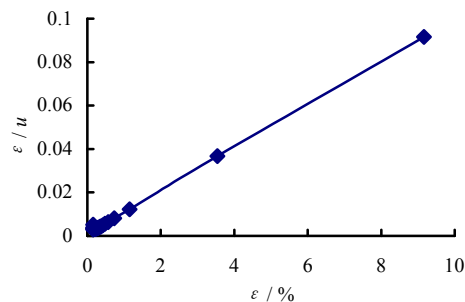


图8 经坐标变换后的孔压-应变关系

Fig.8 Pore pressure-strain relation curve through coordinate system transformation

参数 a 在图 8 中即为直线的截距, 因为 $a = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\varepsilon}{u}$, 故 a 的物理意义就是应变孔压曲线的初始切线斜率, 即 $a = G_i$ 。参数 b 在图 8 中为直线的斜率, 因为 $b = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{1}{u}$, 故 b 的物理意义为孔压应变曲线上孔压渐近线的倒数。用 u_{ult} 来表示孔压应变曲线孔压渐近线的值, 则可将式 (1) 改写成:

$$u = \frac{\varepsilon}{G_i + \varepsilon/u_{ult}} \quad (3)$$

式中 G_i 为应变-孔压曲线的初始切线斜率; u_{ult} 为孔压应变曲线孔压渐近线的值。经过计算分析得到 $a = G_i = 0.003\ 538$, $b = u_{ult} = 0.01$, 将 a , b 值代入式 (3), 可以得到该尾矿料在固结比为 1, 围压为 100 kPa 的条件下的孔压应变模型:

$$u = \frac{\varepsilon}{0.003\ 538 + 0.01\varepsilon} = \frac{100\varepsilon}{0.353\ 8 + \varepsilon} \quad (4)$$

试验和研究结果表明, 该应变-孔压模型是一个较为简单实用的孔压模型, 可以很好地描述饱和尾矿材料的动孔压和应变的变化关系。

3.3 用应力模型预测孔压

对孔压-振次试验结果 (见图 6) 做进一步处理, 可得出如图 9 所示的曲线。

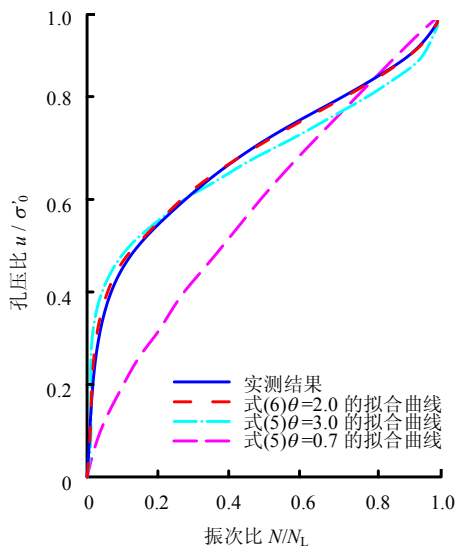


图 9 振次比孔压比关系图

Fig.9 Vibration times-pore pressure ratio relation curve

孔压模型的特点就是将孔压和施加的应力联系起来, 由于动应力的大小应该从应力幅值和持续时间两个方面来反映, 故此类模型中常出现动应力和振次, 或将动应力大小用引起液化的振次 N_L 来隐现, 寻求孔压比 u/σ'_0 和振次比 N/N_L 的关系^[11]。

根据 Seed 在等压固结不排水动三轴试验基础上提出来的关系式^[12]:

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/2\theta} \quad (5)$$

式中 θ 为试验常数; $\sigma'_0 = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$; N 为振次; N_L 为液化破坏时的振次。

大多数情况下可取 $\theta = 0.7$ ^[11]。但对于尾矿材料, 取 $\theta = 0.7$ 显然不合适, 根据试验结果拟合得出 $\theta = 3.0$ 时和实测结果较为接近。如果对式 (5) 进行修正, 采用下式预测动孔隙水压力可以使预测值和实测值更加吻合:

$$\frac{u}{\sigma'_0} = \frac{4}{\pi} \arctan \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/2\theta} \quad (6)$$

从图 9 可知, 在 $N/N_L < 0.3$ 时, 式 (5) 比式 (6) 的预测值要大; 而当 $N/N_L > 0.3$ 时, 预测值又比式 (6) 的预测值要小。振次比在 $[0, 1]$ 的整个区间上, 式 (6) 误差要明显小于式 (5)。由此可见, Seed 提出的公式不太适用于标准砂, 建议对于预测尾矿料的振动过程的孔隙水压力采用式 (6)。

3.4 相对密度及围压对液化特性的影响

在固结比为 1 的条件下, 改变围压和相对密度条件进行动三轴试验, 研究其对动力液化特性的影响。由于该尾矿料在天然状态下其相对密度在 60 % 左右, 为了研究密实后的尾矿料动力特性, 在试验过程中对尾矿材料配置了相对密度 D_r 分别为 60 %, 70 %, 80 % 的 3 种不同的尾矿材料, 分别在 100 kPa 和 400 kPa 围压以及不同的动剪应力比条件下进行试验, 其试验结果如图 10 所示。

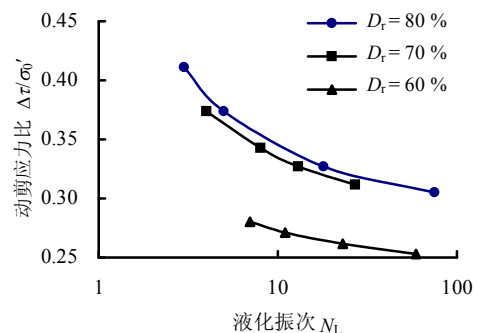


图 10 不同密度尾矿料液化振次与动剪应力比曲线

Fig.10 $\Delta\tau/\sigma'_0$ - N_L curve of different densities of tailings material

由图可知, 当相对密度大于 60 % 时, 增大相对密度可提高其抗液化能力, 但相对密度的增加和抗液化能力并不是线性增长, 相对密度大于 70 % 后,

其抗液化能力的提高很不明显。对于尾矿坝来说, 要增加其抗震性能, 加密尾矿材料是一个可行的办法, 但是当相对密度超过一定的值后, 经济效益就会明显降低, 对于铜矿尾矿料及与其相近的尾矿料, 推荐的相对密度最优值为 70 % 左右。

不同围压下动力特性试验曲线如图 11 所示, 在相同液化振次条件下, 围压越高, 动剪应力比越低。

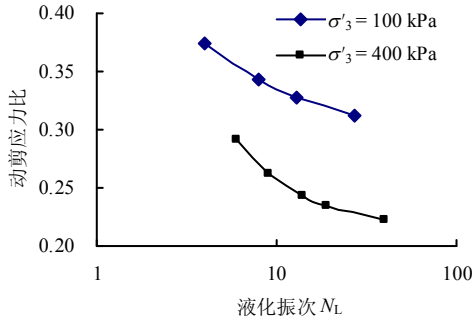


图 11 不同围压下液化振次 N_L 和动剪应力比关系曲线
Fig.11 N_L - γ curve under different confining pressures

3.5 动剪模量和阻尼比

动剪模量与阻尼比特性试验是动力反应分析的基本依据之一, 这些关系反映了在动荷载作用下土的应力-应变关系非线性与粘滞性特征。本研究采用共振柱仪微小应变测试系统进行动力变形特性试验, 分别测定在不同围压下尾矿料动剪模量与阻尼比, 试验中动剪应变幅的测试范围为 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$ 。

通过共振柱压力效应试验, 得出尾矿料的最大动剪模量 $G_{\max}$ 与平均有效主应力 $\sigma'_0 = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 的关系曲线, 如图 12 所示。

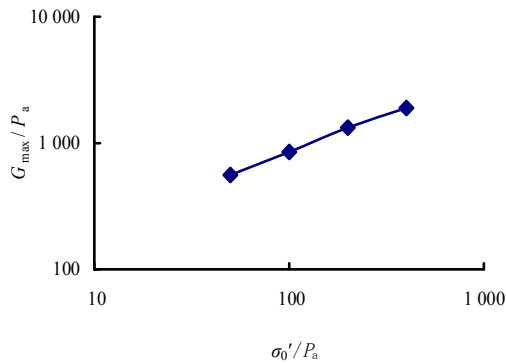


图 12 $G_{\max}/P_a$ - σ'_0/P_a 关系曲线
Fig.12 The $G_{\max}/P_a$ - σ'_0/P_a curve

在双对数坐标中, 最大动剪模量 $G_{\max}$ 与平均有效主应力 σ'_0 之间为直线关系, 可以用如下的幂函数形式表示:

$$G_{\max}/P_a = K(\sigma'_0/P_a)^n \quad (7)$$

式中 P_a 为大气压力; $G_{\max}$, σ'_0 , P_a 采用同一量纲, 动剪模量系数 K 与指数 n 由试验确定, $K = 850$, $n = 0.601$ 。

通过共振柱的应变效应试验, 分别给出了尾矿料在等压固结、围压 σ'_3 分别为 100 kPa, 400 kPa 时的动剪模量比 $G/G_{\max}$ 与动剪应变幅 γ 、阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 的关系曲线, 如图 13、图 14 所示。

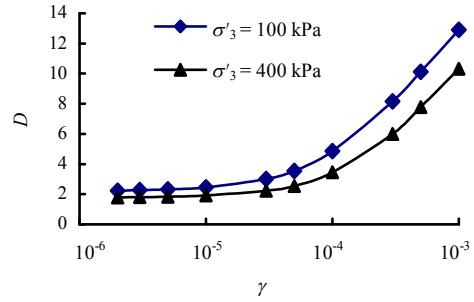


图 13 不同围压下阻尼比 D 与动剪应变幅 γ 关系曲线
Fig.13 D - γ curve under different confining pressures

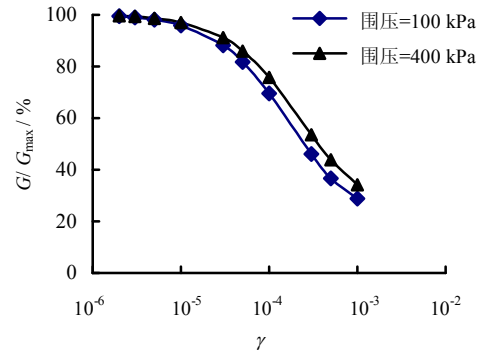


图 14 不同围压下剪切模量比 $G/G_{\max}$ 与剪应变幅 γ 关系
Fig.14 $G/G_{\max}$ - γ curve under different confining pressures

由图 13 可知, 初始应力高的试样阻尼比要小, 随着 γ 的增大, D 的差值将增大, 但是增加的幅值不太明显, 在整个 γ 的区域内, 对于同一个动剪应变幅值 γ , D 随 σ'_3 的增大而减小。由图 14 可以看出, 当 $\gamma < 10^{-5}$ 时, 由于试样基本上处于弹性状态, 不同初始应力条件下试样的 $G/G_{\max}$ 与 γ 的关系曲线差别不大; 当 $\gamma \geq 10^{-5}$ 之后, 试样的动剪模量比与动剪应变幅的关系曲线出现一个带形区域, 在这个区域内, 对于同一个动剪应变幅, 动剪模量比随 σ'_3 的增大而增大, 也就是说, $\gamma = 10^{-5}$ 是不同初始应力条件下试样的动剪模量比与动剪应变幅关系曲线是否出现差别的分界点。

图 13 和图 14 的试验结果表明, 动剪模量随着动剪应变幅的增大而减小, 阻尼比则随着动剪应变幅的增大而增大。动剪模量和阻尼比与动剪应变幅

γ 的关系受围压影响不太敏感, 试验曲线较为接近。

4 结 语

通过对尾矿材料进行一系列的动三轴和共振柱试验, 得出如下的一些成果及结论:

(1) 提出了适用于尾矿料的动孔隙水压力预测公式(见式(6))。

(2) 尾矿料动剪模量和阻尼比与动剪应变幅的关系受围压影响不太敏感, 试验曲线较为接近。

(3) 阻尼比随着动剪应变幅的增大而增大, 动剪模量则随着动剪应变幅的增大而减小。

(4) 在双对数坐标中, 尾矿料最大动剪模量 $G_{\max}$ 与平均有效主应力 σ'_0 之间表现出直线关系。

(5) 对于尾矿材料, 在相对密度小于 70 % 时, 其抗液化能力随着相对密度的增加而明显增加, 而当相对密度大于 70 % 后, 这种趋势并不明显。

致谢: 本文的动三轴和共振柱试验是在中国水利水电科学研究院抗震研究中心实验室进行的, 在此衷心感谢试验室全体工作人员提供的所有帮助!

参 考 文 献

- [1] 王凤江. 上游法高尾矿坝的抗震问题[J]. 冶金矿山设计与建设, 2001, (5): 10—13.
WANG Feng-jiang. Anti-seismic problem of tall tailings dam constructed with upstream method[J]. **Metal Mine Design and Construction**, 2001, (5): 10—13.
- [2] Vick S G. Risk based approach to seismic stability and Inundation Hazard for upstream tailings dams[A]. **Proceedings of International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams**[C]. Sydney: [s.n.], 1990.
- [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, 2003, (4): 24—29.
RUAN Yuan-cheng, GUO Xin. Experimental study on dynamic deformation properties of saturated tailings material[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2003, (4): 24—29.
- [4] 王武林, 杨春和, 阎金安. 某铅锌矿尾矿坝工程勘察与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 332—344.
WANG Wu-lin, YANG Chun-he, YAN Jin-an. Engineering exploration and stability analysis of the tailings dam of a lead-zinc mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1992, 11(4): 332—344.
- [5] 张超, 杨春和, 孔令伟. 某铜矿尾砂力学特性研究和稳定性分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 858—862.
ZHANG Chao, YANG Chun-he, KONG Ling-wei. Study on mechanics characteristics of tailings sands of a copper mine and stability and alysis of tailings dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 858—862.
- [6] 李万升, 高建生, 王治平. 中国尾矿坝地震安全度(8): 大石河尾矿砂的力学特性试验研究[J]. 工业建筑, 1995, (1): 43—47.
LI Wan-sheng, GAO Jian-sheng, WANG Zhi-ping. Earthquake safety of Chinese tailings dam(8): mechanics characteristics studies on dashihe tailings sands[J]. **Industrial Construction**, 1995(2): 38—42.
- [7] 阎金安, 王武林. 尾矿砂的动力特性研究[J]. 岩土力学, 1990, (4): 69—74.
YAN Jin-an, WANG Wu-ling. Study on dynamic properties of tailings sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1990, (4): 69—74.
- [8] 辛鸿博, 王余庆. 中国尾矿坝地震安全度(9): 大石河尾矿粘性土的动力变形和强度特征[J]. 工业建筑, 1995, (2): 38—42.
XIN Hong-bo, WANG Yu-qing. Earthquake safety of Chinese tailings dam(9): cyclic deformation and strength of dashihe slimes[J]. **Industrial Construction**, 1995, (2): 38—42.
- [9] 王余庆, 辛鸿博. 中国尾矿坝地震安全度(10): 用动单剪仪研究大石河尾矿砂的动特性[J]. 工业建筑, 1995, (3): 37—40.
WANG Yu-qing, XIN Hong-bo. Earthquake safety of Chinese tailings dam (10): cyclic simple shear behavior of diashihe tailings sands[J]. **Industrial Construction**, 1995, (3): 37—40.
- [10] SL237 1999, 土工试验规程[S].
- [11] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [12] Seed H B, Lee K L, Idriss I M, et al. The slides in the San Fernando Dams during the earthquake of February 9, 1971[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1975, 101(GT7):637—652.