

文章编号: 1000-7598-(2006) 07-1133-06

细粒含量对尾矿材料液化特性的影响

张 超, 杨春和

(中国科学院岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 为了模拟沉积分选后颗粒组成的变化对尾矿材料的动力特性的影响, 尾矿筛分后按不同的细粒(颗粒直径小于 0.074 mm)含量制备尾矿试样, 并进行了大量的土动力学试验。分析了细颗粒含量对尾矿材料的动力液化特性的影响规律。研究表明, 对于铜矿类尾矿坝的尾矿材料, 当细颗粒含量占到总量的 35 % 时其抗液化性能最佳。根据尾矿材料动力特性试验的研究结果, 并结合现场的标准贯入试验成果, 提出了适用于尾矿材料的细粒含量对标准贯入击数的修正式。该式可以分析不同细粒含量的尾矿材料的抗液化强度, 提高尾矿坝液化判别方法的判别准确程度。

关 键 词: 细粒含量; 土动力学试验; 尾矿材料; 液化特性; 标准贯入试验; 抗液化强度

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Effect of fines content on liquefaction properties of tailings material

ZHANG Chao, YANG Chun-he

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

Abstract: In order to simulate the fines content effect on the liquefaction properties of tailings, the tailings were sieved and then were mixed according to different fines contents to prepare samples. Based on a lot of dynamic tests of these tailings samples, the effect of fines ($d < 0.074$ mm) content on the dynamic liquefaction of tailings was analyzed in detail. The study result has shown that when the fines content is about 35 %, the liquefaction resistance of tailings is the best. Based on the dynamic experiments and lots of standard penetration tests in situ, a modified formula is presented to take the effect of fines content on liquefaction properties into account. The modified formula can analyze the effect of fines content on the liquefaction resistance of tailings material. Consequently, the modified formula can evaluate liquefaction strength of tailings material more accurately.

Key words: fines content; soil dynamic experiments; tailings material; liquefaction properties; standard penetration test; liquefaction resistance

1 前 言

我国每年选矿产生的尾矿约为 3 亿吨, 除一小部分作为矿山充填或综合利用外, 绝大部分堆存于尾矿库。据统计, 目前我国已形成一定规模的尾矿库约 1 500 余座, 绝大多数都采用上游法构筑^[1]。Finn, W. D. L.^[2, 3]认为用上游法建造尾矿坝具有潜在的危险性。Vick, S. G. 指出^[4]“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”, 这些尾矿坝及尾矿库中的尾矿料, 通常处于饱和的疏松状态, 颗粒较细, 比重较大, 由于颗粒组成和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]。国外对在强震区修筑上游法尾矿坝表示怀疑, 从稳定性考虑认为大型尾矿坝最好不要采用上游法^[5]。而我国 20 世纪 50 年代采用上游法建造起来的尾矿坝大多已达到或接近最初设计高度, 由于种种原因不得不继续加高使用。

国外经验表明, 上游法尾矿坝在地震作用下极易发生破坏。对于尾矿坝而言, 液化是坝体发生破坏的主要诱因之一, 尾矿坝的破坏不仅导致矿山生产中断, 而且会危及下游居民的生命、财产以及工厂和交通干线等, 因而国内外对上游法尾矿坝在地震条件下的安全的评价方法甚为关注。1964 年, 美国阿拉斯加州瓦尔迪兹和日本新潟遭受地震, 土的液化引起大量的破坏, 此后开展了大量的研究计划

收稿日期: 2004-10-13

修改稿收到日期: 2005-03-05

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所博士科研启动基金资助项目 (No.Q220604)。

作者简介: 张超, 男, 1978 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事边坡与尾矿坝的稳定性研究和土动力学研究工作。E-mail: zhchsailor@sina.com.cn

来研究和解释控制液化的条件^[6]。国内的研究始于 80 年代,如阎金安、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、王余庆对首钢大石河尾矿坝进行了地震液化的简化判别研究^[8],阮元成、郭新对尾矿料进行了一些研究^[9],指出黏性土尾矿泥的低黏性及其易液化性,初步分析了固结比对尾矿材料的动力特性的影响。这些研究为了解尾矿材料的特性提供了很好的参考,本文侧重于研究尾矿料在动力特性试验下细粒含量对尾矿材料的液化特性的影响。

2 尾矿坝特征及研究意义

尾矿坝是水力冲填坝,尾矿浆的排放方式和尾矿的沉积规律决定了尾矿坝的特征,颗粒越粗沉积就越快,因此颗粒直径越大,其沉积距离就越近。故尾矿坝具有从上到下,从坝区到库内有由粗变细的趋势,典型的尾矿坝体的剖面图如图 1 所示,图中各尾矿材料名称也表明了尾矿坝的沉积规律,而颗粒的粗细是如何影响尾矿材料的动力特性,这方面的研究还没有见过相关的资料。尾矿料的分类主

要是依据颗粒分析结果,不同的尾矿定名的本质就是粗细颗粒的比例不同,因此将全尾矿料通过筛分再重新进行配比后进行动力特性试验,研究细粒含量对动力特性的影响,有明显的意义。本次进行了不同比例的粗细尾矿材料配比下的动力特性试验,以模拟沉积分选后的颗粒组成的变化,分析细颗粒含量对尾矿材料的动力特性的影响,从而间接地了解尾矿坝坝体材料的液化特性。

尾矿材料一般处于疏松到稍密状态,土体越松软,对地震波的放大效应就越明显,震害也就越严重。尾矿材料对地震波的放大效应也比较明显,故尾矿坝在强震条件下容易产生明显的震害。地震情况下尾矿材料发生软化而形成的附加变形,其主要原因是坝体中孔隙水压力的增长,有效应力减小,尾矿材料的强度及变形模量随孔压的升高而降低,当孔压上升到超过上覆压力时坝体就会发生完全的液化现象。而尾矿坝发生液化是导致坝体破坏的主要诱因之一,故研究尾矿材料的液化特性是必要和必需的。

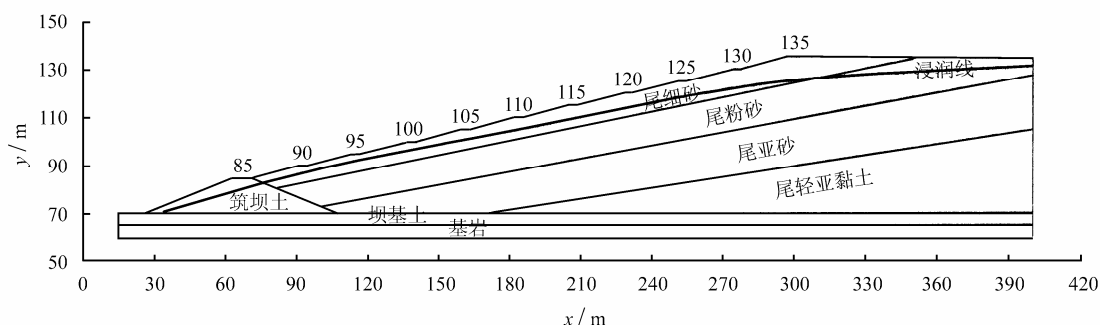


图 1 典型尾矿坝剖面图
Fig.1 Typical map of profile

3 试验设备及方案

动力三轴试验采用 S-3-D 型液压式动三轴仪,尾矿料试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 115 \text{ mm}$,该仪器的最大侧向应力为 1.5 MPa,最大轴向应力为 7.6 MPa,循环荷载激振频率均选用 1 Hz,试验的激振波形采用正弦波。

本次试验所用尾矿料取自某铜矿的尾矿库,为了达到研究沉积分选对材料的动力液化特性的影响,取自该尾矿库的尾矿材料过 0.074 mm 的筛。由《土工试验规程》^[10] 的分类方法可知, $d < 0.074 \text{ mm}$ 的颗粒组被称之为细粒组,而 $0.074 < d < 2 \text{ mm}$ (d 为粒径) 的粒组属于粗粒组里的砂粒,本次试验尾矿料只有筛上和筛下两种尾矿料,故将筛下的材料

称之为细粒尾矿料,而筛上的统称为粗粒尾矿料。与沉积分选过程相类似,将尾矿材料按粒径的粗细进行一次重新排列,在离坝顶远近不同的地方形成不同粗细颗粒配比的尾矿材料,筛分后再按照设定的比例进行配置尾矿材料以模拟尾矿坝的沉积分选过程。

尾矿料动三轴试验的原理和方法以及共振柱试验的方法和资料整理均遵循《土工试验规程》^[10],均采用饱和试样,采用干装法制样,控制干密度装样后进行真空抽气,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,而后施加不同的动应力进行试验。

4 尾矿材料的物理性质

4.1 基本物性指标

对两种尾矿材料进行比重试验、最大干密度和最小干密度试验，基本物性指标见表 1。

表 1 尾矿材料的物理性质指标
Table 1 Physical indexes of tailings materials

材料名称	比重 G_s	干密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	
		最大	最小
粗粒尾矿料	3.02	1.78	1.34
细粒尾矿料	3.04	1.75	1.07

4.2 颗粒组成分析

尾矿是经磨碎的选矿弃物，粉细砂土状，是尾矿坝坝体的构筑材料，其颗粒组成决定坝体的渗透性能、压缩和剪切强度性能以及材料的抗液化性能，也就决定着坝体的静力和动力稳定性。为了解所用的两种尾矿材料的颗粒分布情况，进行了颗粒分析试验，结果见图 2。

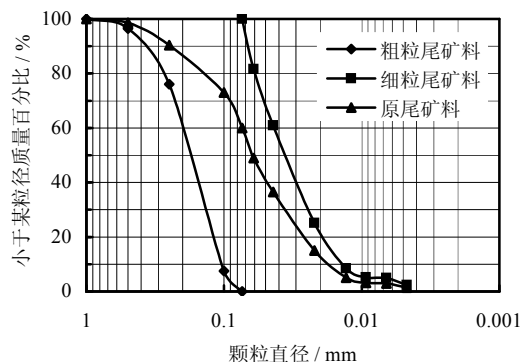


图 2 尾矿材料颗粒分析曲线
Fig.2 Grain-size analysis result of tailings materials

从图 2 可见，粗粒尾矿料中颗粒主要分布在 0.1~0.3 mm 之间，含量占到总量的 80 % 以上；细粒尾矿料中 $d < 0.005$ mm 的粒径含量为 3.8 %，颗粒基本分布在粒径 $0.01 < d < 0.074$ mm 之间，其含量占总量的 96.2 %。粗细颗粒的比重很接近，全尾矿料的颗粒级配曲线也见图 2。粗细两种尾矿材料的级配常数见表 2，可以看出，无论是全尾矿材料，还是经过筛分以后的粗粒和细粒尾矿料，它们的不均匀系数 C_u 均小于 5，曲率系数 C_s 在 0.9~1.1 之间变化，都属于级配不良的土样，液化的可能性大。在放矿过程中发生的沉积分选，使尾矿材料的级配向粗粒和细粒尾矿料这两种材料趋近，其液化的可能性进一步提高。

表 2 尾矿材料的级配常数

Table 2 Particle distribution constant of tailings materials

材料名称	粗粒尾矿料	细粒尾矿料	全尾矿料
d_{60}/mm	0.215	0.043	0.074
d_{50}/mm	0.193	0.037	0.062
d_{30}/mm	0.149	0.025	0.036
d_{10}/mm	0.105	0.014	0.018
C_u	2.05	3.07	4.11
C_s	0.98	1.04	0.97

注: $C_u = d_{60}/d_{10}$, $C_s = d_{30}^2/(d_{10} d_{60})$

5 颗粒组成对尾矿料动力特性的影响

将各种不同颗粒组成的尾矿料配置成同一相对密度的试样，在围压为 100 kPa 的条件下进行一组动三轴试验，试样的相对密度为 60 %，试验结果整理后的液化振次与动剪应力比的试验曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出，细粒料占 25 % 的试样其相应的动剪应力比最大，即抗液化性能最好。为了解更多的颗粒分布对液化性能的影响，对图 3 进行一些处理，即在液化振次为 10 处切出一条线，可以得到液化振次为 10 的情况下细粒含量对动剪应力比的影响曲线，如图 4 所示。

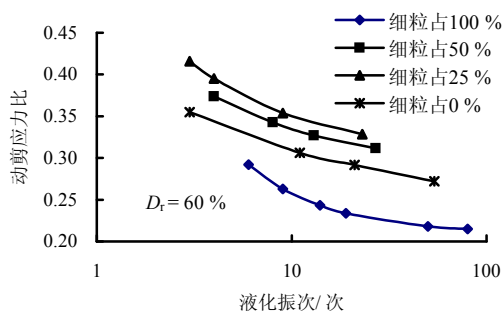


图 3 不同颗粒组成的尾矿料动剪应力比与液化振次关系曲线

Fig.3 $\Delta\tau/\sigma'_0 - N_L$ curve of different fine particle contents of tailings materials

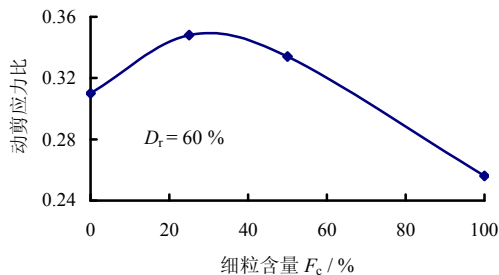


图 4 细粒含量对尾矿材料液化的影响
Fig.4 The curve of effect of fine content on the liquefaction of tailings materials

从图 4 可知, 细粒含量为 35 % 左右时尾矿材料的抗液化能力最强, 这个试验结果和其他材料得到的试验结果^[11, 12]不尽相同, 究其原因应该是材料差异所导致的。阮元成、郭新的研究^[13]认为, 在显微镜下观察可见细颗粒含量高的尾矿泥中石英含量较多, 黏土矿物颗粒较少, 矿物成分具有尾矿砂的特点, 它的亲水性很弱。刘艳华、尹兴科和席满惠等的研究^[14]指出“通常所说的土中黏粒由黏土矿物和非黏土矿物组成, 其中黏土矿物是决定土体性质的主要因素。同样, 在砂土液化过程中, 也是由土中黏土矿物颗粒的相互作用使土体表现出抗液化能力。现行液化判别公式只考虑了黏粒含量影响, 未考虑整个黏土的活动性, 应该说这种做法具有一定的局限性”。

黏粒含量在很大程度上影响着砂土抗液化强度, 其本质也是由砂土中黏土矿物颗粒的相互作用使土体表现出抗液化能力, 而非粒径在黏粒范围内的非黏土矿物起作用。现行规范在判定尾矿坝是否液化时采用了《建筑抗震设计规范》^[15] 的公式, 考虑了黏粒含量影响, 但是尾矿材料与水工上较为常见的黏土坝的筑坝材料是完全不同的, 对于水工上的筑坝黏土, 其材料中黏粒含量以黏土矿物为主, 而对于尾矿材料, 情况就刚好相反, 故在细粒含量明显增大后, 其黏粒含量也明显增大, 但是材料的黏性并不会显著增加。本文的动力试验结果也从一个侧面验证了刘艳华等提出的黏粒由黏土矿物和非黏土矿物组成的观点^[14]的正确性, 因此可以认为本文中的铜矿类尾矿材料的黏粒中大部分应该是非黏土矿物。从试验结果可知, 当黏粒含量随着细粒尾矿材料的含量增加而增加时抗液化性能在 35 % 时, 其抗液化能力最强, 尾矿材料的这种特性是由于粗细尾矿材料在这个比例时其尾矿颗粒骨架最为稳定, 抗液化能力最强。

根据尾矿设施设计规范中的尾矿分类可知, 尾细砂中大于 0.074 mm 的粗颗粒含量较多, 细粒含量要小于 25 %, 而尾粉砂和尾亚砂的细粒含量要大于 25 %, 由尾矿排放和沉积规律可知粗颗粒沉积在离坝体较远的地方, 而细颗粒则沉积在离坝体较远的地方, 从坝体到库内尾矿材料的细粒含量应该是递增的。一般情况下, 在尾矿坝坝体的表层一般都是尾细砂, 其细粒含量是小于 25 %, 根据尾矿沉积规律可知, 从坝体表面到库内尾矿材料的细粒含量应不断增加, 则在尾矿坝一定的范围内一定存在细粒含量占 35 % 左右的一个基本平行于坝体表面的层, 该层的抗液化能力较表层的尾细砂要强。在该

层的靠近坝体和库区两侧的抗液化能力有所降低, 且坝体表层的尾细砂处于浅层, 上覆压力较小, 该层在地震荷载作用下的液化的可能性很大。因此如何降低尾细砂层的液化可能性应该是增加坝体地震稳定性的重要措施之一, 如果在任何时候都使得尾细砂层处于浸润线以上, 那么坝体的地震稳定性将会大大提高。

6 细粒含量对尾矿料抗液化强度的修正

自从 20 世纪初第一次应用标准贯入试验以来, 岩土工程师们从不同方面总结分析了多种经验的相关关系, 来推算土的物理力学参数和评价场地特征, 如用 SPT (standard penetration test 即标准贯入试验) 值估计砂性土的相对密度、内摩擦角、不排水强度、模量和残余强度等, 以及用 SPT 进行基础设计和地震液化评价。目前 SPT 已成为场地地震液化判别及相应液化危害性估计的主要手段和方法, 在各国抗震规范判别场地砂土液化中广泛应用。SPT 在地震液化分析中的广泛应用, 促使标准贯入试验朝着标准化, 规范化方向发展, 已故国际著名学者 Seed^[16]对此作出了杰出的贡献, 他根据多年研究成果和实践经验系统地提出了利用 SPT 值判别土体液化的分析方法, 这一方法目前已被大多数岩土工程师所采纳。

在建筑抗震设计规范中, 当初判材料有液化可能时, 也采用标准贯入击数来进一步判别材料的液化可能性。在地面下 15 m 深度范围内, 液化判别标准贯入锤击数临界值可按下列下式计算:

$$N_{cr} = N_0[0.9 + 0.1(d_s - d_w)]\sqrt{3/\rho_c} \quad (1)$$

在地面下 15~20 m 范围内, 液化判别标准贯入锤击数临界值可按下列下式计算:

$$N_{cr} = N_0(2.4 - 0.1d_s)\sqrt{3/\rho_c} \quad (2)$$

式中 N_{cr} 为液化判别标准贯入锤击数临界值; N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值; d_s 为饱和土标准贯入点深度(m); d_w 为地下水位深度(m); ρ_c 为黏粒含量百分率, 当小于 3 或为砂土时, 应取 3。

当饱和土标准贯入锤击数(未经杆长修正)小于液化判别标准贯入锤击数临界值时, 应判为液化土。当有成熟经验时, 尚可采用其他判别方法^[1]。如果按尾矿坝规范推荐的上述方法, 则可以看出当尾矿材料的黏粒(粒径小于 0.005 mm)含量在大于 3 % 时, N_{cr} 值将会随着 ρ_c 的增大而减小, 即抗液化强度会随着黏粒含量的增加而一直增加, 这显然与动力特性的试验结果不符。

笔者根据尾矿材料的室内动三轴试验并结合 2 个铜矿尾矿坝大量的现场标贯试验的结果, 提出细粒含量百分率对标贯击数的修正式如下:

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } F_c < 35, \Delta N_{cr} &= 0.08F_c \\ \text{当 } F_c \geq 35, \Delta N_{cr} &= 5.6 - 0.08F_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式 (3) 所代表的修正关系如图 5 所示。

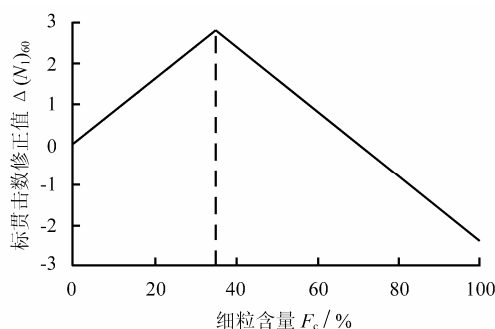


图 5 细粒含量对标贯击数的修正关系

Fig.5 Modified curve of fine contents with SPT counts

将式 (1) 和式 (2) 去掉黏粒修正项, 求出不考虑黏粒的液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr0} , 则

$$N_{cr} = N_{cr0} - \Delta N_{cr} \quad (4)$$

对于同一种选矿工艺下的尾矿材料, 其细粒含量与黏粒含量保持一定的线性关系, 对细粒含量的修正也反映出了对黏粒含量的修正, 提出的细粒含量对抗液化强度的影响表达式符合试验结果, 可以在尾矿坝的液化判别中参考和使用。

7 结 语

通过试验研究了不同细粒含量的尾矿材料在循环加荷条件下的动力特性, 得到了颗粒组成对尾矿材料抗液化性能的影响结果, 了解了沉积规律对尾矿材料液化特性的影响。本文借鉴《建筑抗震规范》^[15] 的液化判别式, 根据尾矿材料动力特性试验结果, 提出了适当的液化判别修正项, 使其更加适用于尾矿这种人工材料, 进而提高对尾矿坝的液化判别的准确程度, 该修正方法对于尾矿坝的液化判别有一定的参考价值, 研究成果可为今后地震区特别是强震区铜矿类尾矿坝的建造、闭库设计和废弃尾矿库的开发利用以及尾矿坝的抗震加固设计提供一些科学依据, 并可为其它类型金属矿山的尾矿坝建造及治理提供一些参考。

参 考 文 献

- [1] 腾志国. 关于尾矿坝地震稳定性的分析及评价[J]. 河北冶金, 2003, (1): 16—17.
TENG Zhi-guo. Analysis and evaluation about tailings dam earthquake stability[J]. *Hebei Metallurgy*, 2003, (1): 16—17.
- [2] Finn W D L, Byrne P M. Liquefaction potential of mine tailing dams[A]. *Proceedings of the 12th International Congress on Large Dams*[C]. Mexico City: ICOLD, 1976.
- [3] Finn W D L. Seismic stability of tailings dams[A]. *Proceedings of International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams*[C]. Australia, 1990.
- [4] 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]. Australia: ICOLD, 1990.
- [5] 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 high tailing dam constructed with upstream method[J]. *Metal Mine Design and Construction*, 2001, (5): 10—13.
- [6] vercueil D, Billet P, Cordary D. Study of the liquefaction resistance of a saturated sand reinforced with geosynthetics[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1997, (16): 417—425.
- [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] 高艳平, 王余庆, 辛鸿博. 中国尾矿坝地震安全度(16)——大石河尾矿坝地震液化的二维简化判别[J]. 工业建筑, 1995, (10): 43—46.
GAO Yan-ping, WANG Yu-qing, XIN Hong-bo. Earthquake safety of Chinese tailings dams(16)—the simplified liquefaction evaluation for Dashihe tailings sands [J]. *Industrial Construction*, 1995, (10): 43—46.
- [9] 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.

- [10] SL237—1999, 土工试验规程[S].
- [11] 衡朝阳, 何满潮, 裘以惠. 含黏粒砂土抗液化性能的试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 339—344.
HENG Chao-yang, HE Man-chao, QIU Yi-hui. Experimental study of liquefaction-resistant characteristics of clayey sand[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2001, 9(4): 339—344.
- [12] Tzou-Shin Ueng, Chia-Wen Sun, Chieh-Wen Chen. Definition of fines and liquefaction resistance of Maoluo River soil[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, (24): 745—750.
- [13] 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 Yuan-cheng, GUO Xin. Experimental study on static and dynamic strength properties of saturated tailings material[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (1): 67—73.
- [14] 刘艳华, 尹兴科, 席满惠. 黏粒和黏土矿物对砂土液化影响的探讨[J]. 勘察科学技术, 2004, (3): 6—9.
LIU Yan-hua, YIN Xing-ke, XI Man-hui. Effect on sandy soil liquefaction by clay particle and clay mineral[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2004, (3): 6—9.
- [15] GB50011—2001, 建筑抗震设计规范[S].
- [16] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1971, SM9: 1 249—1 273.