

循环荷载下尾矿粉土的孔隙水压力特性

杜艳强, 杨春和, 巫尚蔚

(重庆大学 煤矿动力灾害与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 为了解尾矿粉土在振动作用下的孔隙水压力特性, 采用 GDS 动三轴试验系统对尾矿粉土进行了循环荷载试验, 通过施加循环应力使尾矿粉土达到完全液化状态, 研究了相对密度及固结围压对尾矿粉土孔隙水压力特性的影响。研究表明, 尾矿粉土的孔压增长过程可分为 4 个阶段: 孔压快速增长阶段、孔压稳定增长阶段、结构破坏阶段及完全液化阶段; 相对密度及围压的增加可以提高其抗液化能力。对比尾矿粉土及砂土试验结果发现: 循环荷载作用下尾矿粉土的孔隙水压力特性与砂土不同, 其孔压增长规律可用一个双 S 型模型描述, 该模型对粉土和砂土均具有较好的适用性。

关键词: 尾矿粉土; 孔隙水压力; 模型; 循环荷载; 动三轴试验

中图分类号: TD 315 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)04-0583-06

Pore-Water Pressure Characteristics of Tailings Silt Under Cyclic Loading

DU Yan-qiang, YANG Chun-he, WU Shang-wei

(State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Corresponding author: YANG Chun-he, E-mail: 20112002022@cqu.edu.cn)

Abstract: A GDS dynamic triaxial testing system was used for cyclic loading test to study pore-water pressure behaviors in tailings silt. Cyclic stress was applied to liquefy the tailings silt. The influences of relative density and confining pressure on pore-water pressure in tailings silt were studied. The results showed that the development of pore-water pressure can be divided into four stages, namely rapidly growing stage, stabilized-increasing stage, structural failure stage and fully liquefied stage. The increase of confining pressure and relative density can strengthen the capacity of anti-liquefaction. The result of lab tests on tailings silt was compared with that on sand, it showed that the characteristic of dynamic pore-water pressure for tailings silt is different from that of sand, and it can be described with a double-S model which has a very good application in both tailings silt and sand.

Key words: tailings silt; pore-water pressure; model; cyclic loading; dynamic triaxial test

尾矿是矿石经破碎、磨细和选矿后排出的一种人工土颗粒, 颗粒成分按粒径大小可分为砂粒(大于 0.075 mm)、粉粒(0.005 ~ 0.075 mm)、黏粒(小于 0.005 mm)。根据各颗粒组分含量差异和塑性指数的不同, 可将尾矿分为尾矿砂、尾粉土、尾粉质黏土、尾黏土 4 大类。尾矿粉土是指粒径大于 0.074 mm 颗粒的质量不超过总质量的 50%, 且塑性指数不大于 10 的尾矿。截止 2013 年底, 我国共有 11 666 座尾矿库, 尾矿库分布遍及

全国, 其中在用尾矿库 6 034 座, 且尾矿排放量正以每年 3.5 亿 t 的规模增加。随着选矿工艺的改进, 尾矿材料的平均粒径朝着更细的方向发展, 就铅锌尾矿而言, 尾矿的主要成分已经由砂土变为粉土。选矿厂排出的尾矿在水力冲填作用下逐渐沉积于尾矿坝上游, 经过分选作用, 尾矿粉土成为组成坝体结构的主要颗粒成分。由于尾矿粉土固结排水性差、渗透性低, 随着筑坝高度的增加, 坝体浸润线不断抬升, 其稳定性问题尤其是地震影

收稿日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51234004); 国家自然科学基金资助项目(41272391)。

作者简介: 杜艳强(1988-), 男, 河南浉池人, 重庆大学博士研究生; 杨春和(1962-), 男, 江西丰城人, 重庆大学教授, 博士生导师。

响下的动力稳定性问题成为矿山企业不可回避的现实难题。

1 孔压增长机理及研究概况

土体液化是土中孔隙水压力不断上升,颗粒骨架所承受的有效应力不断降低,土体由固体向液体转化的过程。孔隙水压力在动荷载作用下的发展规律是土体变形和强度变化的重要因素,是使用有效应力分析法分析问题的关键。土的体积应变可以分为两部分:有效球应力引起的体变分量 $\Delta\varepsilon_{vc}$ 和偏应力引起的体变分量 $\Delta\varepsilon_{vd}$ 。假定土颗粒和水均为不可压缩体,在不排水条件下有效球应力和偏应力引起的体积应变应满足如下的体积相容性条件:

$$\Delta\varepsilon_{vc} + \Delta\varepsilon_{vd} = 0. \quad (1)$$

由此可得

$$\Delta u = -\Delta p' = -K_T \Delta\varepsilon_{vc} = K_T \Delta\varepsilon_{vd}. \quad (2)$$

式中: Δu 为超孔隙水压力; $\Delta p'$ 为有效球应力; K_T 为土的切线体积模量。

自美国 Alaska 地震和日本新泻地震之后,关于砂土液化问题的研究已经取得了巨大的进展^[1-4],而对粉土的孔隙水压力特性研究则较少。根据室内试验结果可知,尾矿粉土与砂土在物理性质上存在一定差异,主要表现在:尾矿粉土颗粒多为光滑的圆形而砂土菱角分明,尾矿粉土具有一定的保水性,主要颗粒成分是直径为 0.005 ~ 0.075 mm 的粉粒,砂粒及黏粒仅占少数;尾矿粉土为母矿磨细而来,矿物成分以二氧化硅为主,含有少量金属成分,颗粒比重大于一般砂土,颗粒亲水性差,但由于颗粒较细渗透性差,因而与砂土相比保水性较好。鉴于尾矿粉土和砂土物理特性的差别,有必要专门针对尾矿粉土的孔隙水压力特性进行研究。

国内外学者对于可液化土的孔隙水压力进行了广泛研究:Seed 等^[5]提出以孔压值作为判断砂土是否液化的依据;Martin 等^[6]通过地震时土体积的相容条件建立了一个确定孔隙水压力增量的基本方程式;Finn 等^[7]引入内时理论将多因素影响的孔压曲线簇表示为单一的破损函数;曹亚林等^[8]对标准砂的孔隙水压力特性进行了研究,从能量角度分析认为孔压与能量之间具有显著的归一化特性;余跃心等^[9]研究了黄土的孔压增长规律,提出修正的 A 型曲线方程,认为未湿陷饱和黄土结构是一种介稳结构,塌陷剪缩共同作用造成孔隙水压力的上升;陈国兴等^[10]对南京地区粉

土进行研究得出:均压固结条件下,其振动孔压发展规律可以用双曲线模型进行拟合;张超等^[11]引入修正的 Seed 孔压模型,用于预测振动作用下尾矿砂的孔隙水压力。

自太沙基建立土的有效应力原理以来,人们逐渐认识到孔隙水压力特性对土体动力特性的重要影响,但并没有找到一个能描述多因素影响下各种液化土的孔压模型。上述研究多针对于砂土,对粉土类的研究尚不系统,本文以甘肃某铅锌矿尾矿粉土为原料进行动三轴循环荷载试验。

2 试验设备及方法

动荷载作用下土颗粒的粒径、密度、黏粒成分含量、土层形成的地质年代、地震历史、饱和程度及现场条件都会影响其孔隙水压力特性,结合尾矿库工程的实际特点,考虑尾矿库工程的实际情况,本试验主要研究埋深及密度(换算为试验条件即为固结围压和相对密度)对孔隙水压力特性的影响。

2.1 试验仪器

试验采用英国 GDS 动三轴试验系统,如图 1 所示,该系统其由压力室、轴向加压设备、围压施加系统、体积变化和孔隙压力量测系统所构成。试验机主要性能参数:体变精度为 0.1%,分辨率为 0.04 mL;轴向位移传感器精度为 0.07%,分辨率为 0.208 mm;竖向振动频率为 0.01 ~ 5 Hz。



图 1 GDS 动三轴试验系统

Fig. 1 GDS dynamic triaxial test system

2.2 试样制备及试验方法

本试验项目的原料取自某铅锌矿尾矿库,原状尾矿干密度介于 1.42 ~ 1.86 g/cm³,最大埋深 80 m,其颗粒分析试验结果如图 2 所示,基本物理性质如表 1 所示。为研究相对密度对孔隙水压力特性的影响,在 300 kPa 固结围压下分别制备不同密度的试样进行液化试验,相对密度分别为 35%, 50%, 65%, 80%, 对应的干密度分别为

1.55, 1.61, 1.68, 1.75 g/cm³; 为研究固结围压对孔隙水压力特性的影响, 制备相对密度为 65% 的试样分别置于 100, 200, 300, 400 kPa 的围压下进行循环加载试验, 相对密度和干密度按式 (3) 进行换算:

$$D_r = \frac{\rho_{dmax}(\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} \quad (3)$$

式中: D_r 为相对密度; ρ_{dmax} 为最大干密度; ρ_{dmin} 为最小干密度; ρ_d 为装样干密度.

试样制备按照土工试验规程进行, 制样时按设计密度计算试样质量, 将试样分三层装入压实仪, 在分层处凿毛后将试样击实成型, 试件尺寸为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$. 动三轴试验方案如表 2 所示, 试验前, 先将试样放入饱和器内抽真空饱和, 饱和时间大于 24 h, 然后进行反压饱和, 保证试样饱和度大于 98%. 饱和试样在等压条件下进行固结, 待试样固结稳定后, 施加轴向正弦等幅应力循环荷载, 荷载频率为 1.0 Hz, 荷载曲线如图 3 所示. 饱和土加载试验中轴向应力和轴向应变通过下式转换成剪应力和剪应变:

$$\tau = \sigma_d / 2, \quad (4)$$

$$\gamma = (1 + \nu) \cdot \varepsilon. \quad (5)$$

式中: τ 为剪应力; σ_d 为动应力; γ 为剪应变; ν 为泊松比; ε 为轴向应变. 对于饱和土体的不排水剪切试验, 泊松比 ν 可取 0.5.

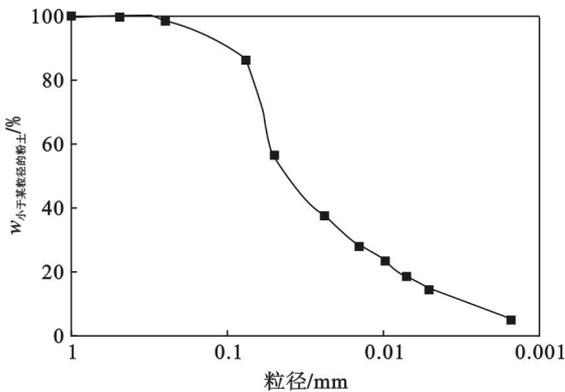


图 2 尾矿粉土的颗粒分析结果

Fig. 2 Grain size analysis test result of tailings silt

表 1 尾矿粉土的基本物理性质

Table 1 Physical properties of full tailings silt

质量分数/%			塑限	液限	塑性指数	颗粒密度
砂粒	粉粒	黏粒	W_p /%	W_L /%	I_p /%	
15	70	15	15.4	22.8	7.4	2.91

2.3 试样破坏条件选择

砂土或粉土的液化试验一般以孔压比或者应变率作为破坏标准, 本试验以孔压达到围压, 或者轴向动应变达到 5% 作为破坏条件, 试样达到破

坏标准后再振动 10 周.

表 2 尾矿粉土动三轴试验方案

Table 2 Dynamic triaxial test schemes of tailings silt

试样编号	围压	相对密度	干密度
	kPa	%	$\text{g} \cdot \text{cm}^3$
1 [#]	100	65	1.68
2 [#]	200	65	1.68
3 [#]	300	65	1.68
4 [#]	400	65	1.68
5 [#]	300	35	1.55
6 [#]	300	50	1.61
7 [#]	300	80	1.75

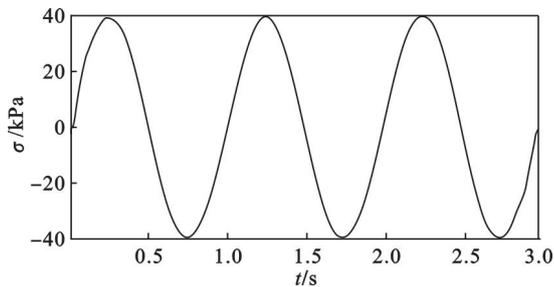


图 3 循环加载曲线

Fig. 3 Cyclic loading curve

3 试验结果及分析

3.1 尾矿粉土的孔压增长特征

图 4 为振动过程中尾矿粉土典型的孔压增长曲线, 根据曲线特征可将尾矿粉土的液化过程分为 4 个阶段, 各个阶段的主要特征如下.

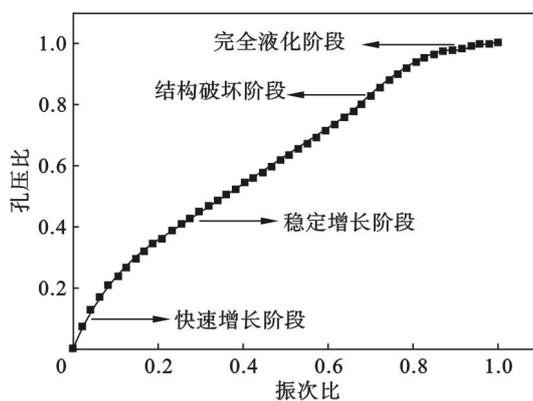


图 4 典型的尾矿粉土孔压增长曲线

Fig. 4 Representative pore pressure curve of tailings silt

1) 孔压快速增长阶段: 振动开始后孔隙水压力迅速增加, 振次比介于 0 ~ 0.1, 孔压比增长至 0.2 左右, 孔压增长曲线为上凸形状.

2) 孔压稳定增长阶段: 振次比介于 0.2 ~

0.6, 孔压比随着振次比增加至 0.7 左右, 孔压增长曲线形状为直线.

3) 结构破坏阶段: 振次比介于 0.7 ~ 0.8, 最大孔压比约为 0.9, 孔压增长曲线形状仍为直线, 孔压增速大于其稳定增长阶段增速, 试样结构遭到破坏.

4) 完全液化阶段: 振次比大于 0.9, 孔压增速显著降低, 孔压增长曲线接近水平形状, 孔压逐步达到围压, 试样完全液化.

对于尾矿粉土的孔压增长特征, 可从颗粒粒径和渗透性两方面分析其增长机理: 由于粉土的粒径较小, 渗透性系数较低, 故在开始阶段孔压不易消散, 颗粒产生较大的体变势, 孔压快速增长; 孔隙压力的增加使得细小黏粒向其他孔压较低的部位转移, 颗粒体变势减小, 导致孔隙水压力增速降低; 随着细小黏粒的转移, 试样结构遭到破坏, 孔隙水压力加速增长; 少量黏粒的存在使得尾矿粉土仍具有一定的黏结强度, 限制了孔隙水压力的增大, 致使其后期增速缓慢, 直到孔隙水压力趋于围压, 试样完全液化.

3.2 相对密度对孔压增长曲线的影响

由于颗粒成分和压实程度的不同, 尾矿粉土的相对密度常在一定范围内变化. 图 5 为 100 kPa 围压条件下, 循环荷载作用时不同相对密度尾矿粉土的孔压增长曲线, 根据试验结果可知松散尾矿粉土的孔隙水压力增长较快, 在较少的振次下孔隙水压力即可达到围压, 试样更易液化. 随着相对密度从 35% 增大至 80%, 尾矿粉土的抗液化能力迅速增加, 孔压增长曲线形状由陡峭逐渐变为平缓, 相应的液化振次从 130 次增加至 690 次. 相对密度为 35%, 50% 时, 孔压增长曲线类似一条双曲线形状, 具备 3.1 节中所描述的孔压快速增长阶段、孔压稳定增长阶段和完全液化阶段, 而结

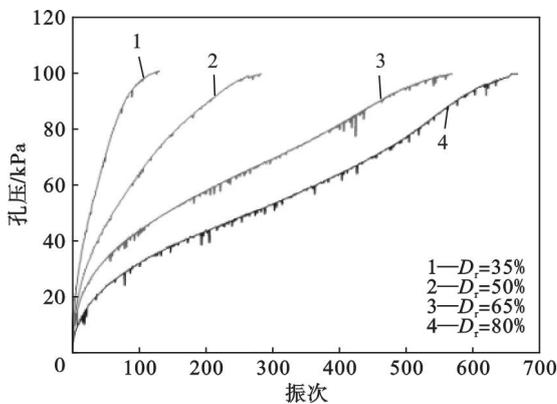


图 5 不同相对密度下尾矿粉土的孔压增长曲线
Fig. 5 Pore-water pressure curves of tailings silt with different relative densities

构破坏阶段并不明显; 当相对密度增加到 65%, 80% 时, 孔压增长的阶段性逐渐明显, 孔压增长曲线特征可用 3.1 节中描述的孔压快速增长—孔压稳定增长—结构破坏—完全液化 4 个阶段概括.

3.3 围压对孔压增长曲线的影响

尾矿库工程中由于埋深的差异, 不同位置处尾矿粉土所受到的围压并不相同, 为探究围压对尾矿粉土孔隙水压力特性的影响, 进行了相对密度为 50% 的尾矿粉土在不同围压条件下的循环荷载试验. 由图 6 可知: 在 100, 200, 300, 400 kPa 的固结围压下, 尾矿粉土的液化振次分别为 94, 150, 285, 346 次, 表明随着围压的增加, 其抗液化能力不断增强, 孔压增长曲线形状逐渐变缓, 孔压增长的阶段性逐渐明显, 与 3.1 中描述的孔压增长特征相符.

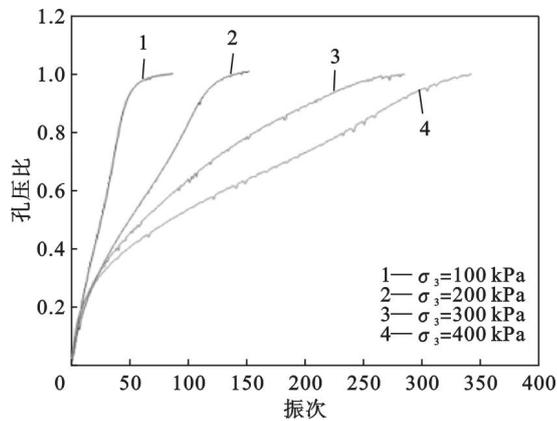


图 6 不同围压下的尾矿粉土的孔压增长曲线
Fig. 6 Pore-water pressure curves of tailings silt under different confining pressures

3.4 尾矿粉土、砂土的孔压增长特征对比

自 Seed 提出式 (6) 所示的砂土孔隙水压力增长模型以来,

$$\frac{\mu}{\sigma_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{N}{N_L}\right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (6)$$

式中: μ 为孔隙水压力; σ_0 为围压; N 为振次; N_L 为孔压达到围压时的液化振次; θ 为试验常数, 一般取 0.7. 不少学者对 Seed 孔压模型进行了修正^[9,11]. 图 7 为归一化条件下尾矿粉土和 Seed 模型中砂土的孔隙水压力增长曲线, 通过对比发现二者的孔压增长特性存在以下区别.

- 1) 尾矿粉土的孔压增长曲线整体呈上凸形状, 而砂土的孔压增长曲线整体呈现出下凹形状.
- 2) 初始加载阶段, 尾矿粉土的孔隙水压力增速大于砂土.
- 3) 临近完全液化阶段, 砂土孔隙水压力加速

增长,表现出迅速破坏的特征,而尾矿粉土的孔隙水压力在此阶段增速逐渐减小,破坏特征为渐变破坏.

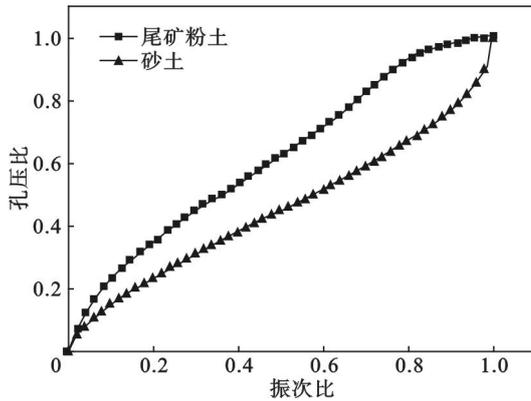


图 7 尾矿粉土、砂土的孔压增长曲线

Fig. 7 Pore pressure curves of tailings silt and sand

4 尾矿粉土的双 S 型孔压增长模型

由上述对比可知循环荷载下尾矿粉土的孔隙水压力增长特征与砂土相比差别较大,式(6)中砂土的孔隙水压力模型并不适用于尾矿粉土. BiDoseResp 函数曲线特征如图 8 所示,根据试验结果,尾矿粉土的孔隙水压力各阶段特征与 BiDoseResp 函数中的 h_1 — A_2 段曲线相符,因此提出了尾矿粉土孔隙水压力的双 S 型描述模型:

$$\frac{\mu}{\sigma_0} = A_1 + (A_2 - A_1) \times \left[\frac{P}{1 + 10^{(B_1 - \frac{N}{N_L})h_1}} + \frac{1 - P}{1 + 10^{(B_2 - \frac{N}{N_L})h_2}} \right] \quad (7)$$

式中: μ/σ_0 为孔压比; N/N_L 为振次比; $A_1, A_2, B_1, B_2, h_1, h_2, P$ 均为模型参数; h_1 为孔压快速增长阶段的曲线斜率; h_2 为结构破坏阶段的曲线斜率; A_1, A_2 为模型的值域. 用式(7)中的双 S 模型对试验数据进行拟合,模型参数拟合结果如表 3 所示.

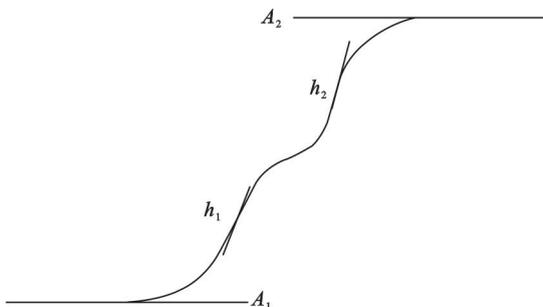


图 8 BiDoseResp 函数图像特征

Fig. 8 Curve features of BiDoseResp function

的试验数据进行拟合的结果,可以看出该模型对试验数据的拟合度很高,相关性系数 R^2 达到 0.998. 同样,以相同的方式对其他 6 个试样的试验数据进行拟合,拟合结果如表 3 所示. 表 3 中拟合结果的相关性系数均达到 0.99 以上,对模型参数拟合结果进行分析可知:随着相对密度的增加,孔压快速增长阶段孔压增速不断变大,而结构破坏阶段孔压增速不断减小;围压的变化对孔压快速增长阶段和结构破坏阶段的孔压增速影响明显;模型参数中 A_1 与 h_2 的变化范围较大,而其余参数波动较小, $A_2, B_1, B_2, h_1, h_2, P$ 的平均值分别为 1.714, -0.306, -0.208, 6.914, 2.431, 0.856. 利用该模型对 Seed 砂土的试验数据进行拟合,拟合曲线如图 10 所示,拟合结果相关性系数达到 0.997,表明该模型对砂土同样具有良好的适用性,但与试验尾矿粉土的计算结果相比,砂土的模型参数发生了较大变化. 原因在于砂土的孔压增长特征大致只有快速增长、稳定增长、结构破坏三个阶段,砂土液化时结构发生突然破坏,曲线形状上翘,而尾矿粉土因液化过程较慢,曲线呈近似水

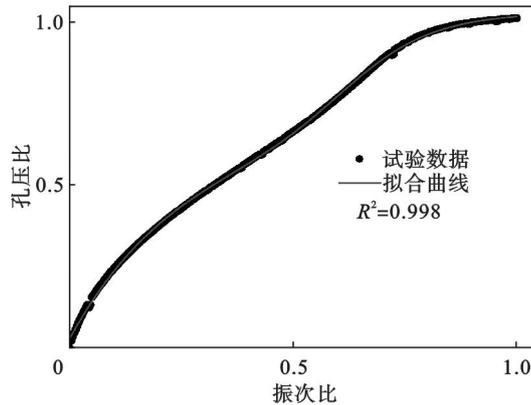


图 9 双 S 孔压模型对试验数据的拟合曲线 (7# 试样)

Fig. 9 Fitting curve of double-S model (7# sample)

表 3 模型参数拟合结果

Table 3 Fitted parameters by double-S model

试验编号	A_1	A_2	B_1	B_2	h_1	h_2	P	R^2
1#	-1.13	1.01	-0.102	0.425	2.35	7.16	0.836	0.999
2#	-25.27	1.03	-0.888	0.616	1.82	4.46	0.985	0.999
3#	-11.81	1.13	-0.125	-0.183	13.57	1.06	0.821	0.999
4#	-36.16	3.32	-0.203	-2.246	10.09	0.16	0.749	0.998
5#	-17.21	1.03	-0.245	0.293	7.23	2.41	0.953	0.999
6#	-24.73	3.06	-0.208	-1.196	9.16	0.19	0.734	0.998
7#	-11.28	1.42	0.374	0.838	4.18	1.58	0.913	0.998

图 9 为采用双 S 型孔压增长模型对 7# 试样

平形状,二者孔压增长曲线特征的不同导致模型参数有差异较大,但双 S 模型对试验数据的拟合度都达到 0.99 以上,因此该模型对砂土和尾矿粉土均具有较高的适用性。

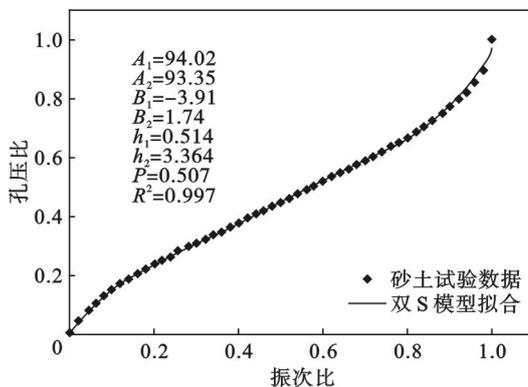


图 10 双 S 模型与砂土试验数据的拟合分析
Fig. 10 Data fitting analysis of sand with double-S model

5 结 语

1) 尾矿粉土的孔压增长过程分为 4 个阶段:孔压快速增长阶段—孔压稳定增长阶段—结构破坏阶段—液化阶段。

2) 相对密度和围压的增大将使得尾矿粉土的抗液化能力明显增强。

3) 尾矿粉土的孔隙水压力增长特征可用一个多参数的双 S 型模型描述,该模型对于砂土同样具有较好的适用性。

4) 对于不同类型的可液化土,模型参数可能存在一定差异,模型参数的确定仍需要相应的试验进行研究。

参考文献:

[1] Stark T D, Olson S M. Liquefaction resistance using CPT and field case histories[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(12): 856-869.

[2] Andrus R D, Stokoe K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, 126(11): 1015-1025.

[3] Guo T Q, Prakash S. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1999, 125(8): 706-710.

[4] Seed H B, Lysmer J, Martin P P. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102(4): 323-346.

[5] Seed H B, Lee K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 1966, 92(6): 105-134.

[6] Martin G R, Finn W D. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 1975, 101(5): 423-438.

[7] Finn W D L, Bhatia S K. Prediction of seismic pore pressure [C]// *Soil Mechanics and Foundations Division*. Rotterdam, 1981: 202-206.

[8] 曹亚林,何广讷,林皋. 土中振动孔隙水压力升高程度的能量分析法[J]. *大连理工大学学报*, 1987, 26(3): 83-89. (Cao Ya-lin, He Guang-na, Lin Gao. An energy approach for analyzing the development of cyclic pore water pressure[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1987, 26(3): 83-89.)

[9] 余跃心,刘汉龙,高玉峰. 饱和黄土孔压增长模式与液化机理试验研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(4): 395-399. (She Yue-xin, Liu Han-long, Gao Yu-feng. Study of liquefaction mechanism and pore-water pressure mode of saturated original loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(4): 395-399.)

[10] 陈国兴,刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 79-82. (Chen Guo-xing, Liu Xue-zhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay inter bedded with fine sand of Nanjing [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 79-82.)

[11] 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): 35-40.)