

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.08.021

尾矿粉土液化后的大变形特性试验研究

杜艳强¹, 杨春和^{1,2}, 张超², 巫尚蔚¹

(1. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 利用 GDS 动三轴试验系统研究尾矿粉土液化后的变形特性. 首先对饱和尾矿粉土进行振动使其液化, 再施加静力荷载; 分析了固结围压、相对密度、加载速率等因素对变形与孔隙水压力的影响. 研究了饱和尾矿粉土液化后的流动变形与孔隙水消散的变化规律. 结果表明: 不排水试验条件下, 固结围压、相对密度对尾矿粉土液化后的流动变形特性影响明显, 而加载速率的影响较小; 加载试验的最终孔压比一般介于 0.7 ~ 0.9 之间, 相对密度对孔压消散过程的影响大于围压的影响. 根据试验结果提出了描述尾矿粉土液化后变形特性的三参数模型, 并进行了模型参数的拟合计算及模型验证和对比. 结果表明该模型具有良好的适用性.

关键词: 尾矿粉土; 孔隙水压力; 液化; 变形; 本构模型

中图分类号: TD 315 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)08-1166-06

Experimental Study on Large Post-Liquefaction Deformation Behavior of Tailings Silt

DU Yan-qiang¹, YANG Chun-he^{1,2}, ZHANG Chao², WU Shang-wei¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China. Corresponding author: DU Yan-qiang, E-mail: cqduyq@163.com)

Abstract: The GDS dynamic triaxial testing system was used to study the reloading feature of liquefied tailings silt. First, the saturated tailings silt was liquefied by cyclic loadings, then, the static loadings were applied to the liquefied tailings silt. The deformation and pore water pressure of the liquefied tailings silt were experimentally studied, with confining pressure, relative density and loading rate considered. The results show that, the confining pressure and relative density impact on the deformation of liquefied tailings silt obviously, while the loading rate has little effect, under undrainage condition. Pore water pressure ratio is usually between 0.7 ~ 0.9 at the end of the experiment. Relative density has greater impact on the pore water pressure than confining pressure. Based on the experimental data, a new three-parameter constitutive model of liquefied tailings silt is presented and the model parameters are determined by fitting. It is validated that the model proposed has good applicability and forecast precision.

Key words: tailings silt; pore water pressure; liquefaction; deformation; constitutive model

液化后变形是指土在动荷载作用下第一次出现有效应力等于零(初始液化)后继续振动过程中产生的变形; 由于这种变形远大于液化前的变形, 故称之为液化后大变形. 由液化引发的土体大变形是导致工程结构破坏的主要原因. 尾矿坝是

一类水力冲填坝, 由于排矿过程的不均匀性, 常呈现坝体材料分层、固结性差的特点, 暴雨、地震等灾害容易引发尾矿的液化变形而导致溃坝事故.

液化并不一定存在危害, 只有当液化引起的变形足以危害结构物安全或正常使用时才造成危

收稿日期: 2015-07-31

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.

害. Ishihara^[1]指出: 缓坡地面、冲积堤坝下的饱和砂土一旦液化, 将引起沉降或上覆结构破坏, 地面会发生很大侧向水平位移; Hamada^[2]和 Bartlett等^[3]通过震害调查分别提出了预测地面大变形的经验公式; Tokimatsu等^[4]建立了根据标贯击数计算液化后地面水平方向大位移的经验公式; Yasuda等^[5]试验研究了各因素对液化后变形特性的影响, 提出了描述液化后变形特征的双直线模型; 顾宝和等^[6]认为地震引起孔隙水自下而上的渗流从而引起渗透液化; 刘汉龙等^[7]提出了一个描述砂土液化后应力应变关系的双曲线形模型; 陈育民等^[8]引入流体力学中流体表观黏度的概念, 指出液化砂土是一种剪切稀化非牛顿流体.

高地震烈度区尾矿坝的地震稳定性是矿山安全生产的重大隐患, 而尾矿动力特性及其液化后的流动变形性质直接影响尾矿坝的破坏程度和影响范围. 已有的研究主要集中在尾矿坝材料的静动力特性、尾矿坝的地震液化判别及溃坝模型和溃坝风险评价方面^[9-11], 而对地震作用下尾矿砂液化后的大变形特性研究较少. 本文以甘肃某铅锌矿的尾矿粉土为原料研究液化后的变形特性.

1 试验概况

1.1 试验仪器及试样制备

试验采用英国 GDS 动三轴试验系统. 试验机主要性能参数: 体变分辨率 0.04 mL; 轴向位移传感器分辨率 0.208 mm; 竖向振动频率 0.01 ~ 5 Hz.

试验原料取自某铅锌矿尾矿库, 该原料为尾矿坝的主要筑坝材料, 图 1 为尾矿土样的颗粒分析试验结果, 其基本物理性质如下: 最小孔隙比 0.42, 最大孔隙比 0.86, 塑限 15.4%, 液限 22.8%, 塑性指数 7.4%, 颗粒相对密度 2.91. 根据颗粒试验和物理性质测试结果可将该尾矿定名为尾粉土. 制样时按照干密度控制试样密度, 将试样分三层装入压实仪, 并在相应的击实高度将各层接触面刮毛, 保证上下层接触良好, 试样尺寸为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$.

1.2 试验方法

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%. 试样采用等压固结, 固结完成后, 在不排水条件下, 先施加频率为 1 Hz 的循环荷载, 使试样液化, 液化标准为孔压达到围压后再振动 10 周, 然后采取应变控制的方式施加静荷载, 加载过程如图 2 所示.

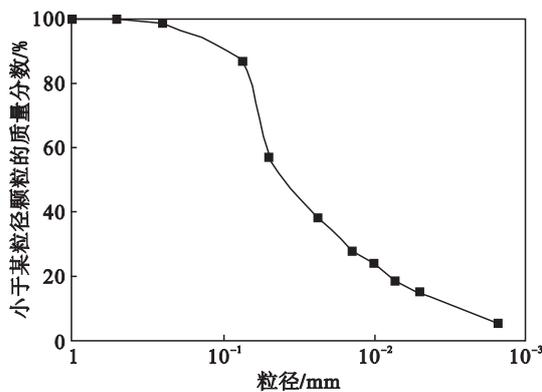


图 1 尾粉土的颗粒分析试验曲线
Fig. 1 Grain size analysis result of tailings silt

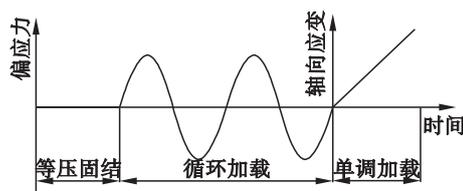


图 2 试验加载过程
Fig. 2 Loading process of lab tests

本次试验考虑了固结围压、相对密度和加载速率对尾矿粉土液化后变形及流动特性的影响: 固结围压分别为 100, 200, 300 和 400 kPa; 相对密度分别为 35%, 50%, 65% 和 80%; 加载速率分别为 4.0, 2.0, 1.0, 0.5 和 0.25 mm/min, 相对密度和干密度按下式进行换算:

$$d = \frac{\rho_{d,max}(\rho_d - \rho_{d,min})}{\rho_d(\rho_{d,max} - \rho_{d,min})} \quad (1)$$

式中: d 为相对密度; $\rho_{d,max}$ 为最大干密度, 尾矿粉土 $\rho_{d,max} = 1.86 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{d,min}$ 为最小干密度, 尾矿粉土 $\rho_{d,min} = 1.42 \text{ g/cm}^3$; ρ_d 为装样干密度.

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:

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

$$\gamma = (1 + \nu) \cdot \varepsilon \quad (3)$$

式中: τ 为剪应力; σ_d 为动应力; γ 为剪应变; ε 为轴向应变; ν 为泊松比, 对于饱和土体的不排水剪切试验, 泊松比 ν 可取 0.5. 试验方案如表 1 所示.

2 试验结果及分析

2.1 典型的液化后变形曲线

土中孔隙水压力的产生与发展是影响土体强度和变形特性的重要因素. 如图 3 所示: 不排水条件下循环振动作用将引起土颗粒变形势能的增加, 进而使得孔隙水压力不断增长, 当超孔隙水压

力等于初始有效应力时,体系发生液化,当土体完全液化时颗粒间的有效应力降为零,失去抵抗剪切的能力.图 4 所示:液化后土体中的孔隙水压力不再变化,大小等于围压,因此液化后各应力循环的有效应力路径也完全重合,但变形仍然随着应力循环次数的增加而增大.可将液化后土体剪切面上的应力状态分为零有效应力状态和非零有效应力状态,分别对应剪应变分量 γ_0 和 γ_d ; 而且 γ_d 只依赖于作用剪应力的变化而与应力应变的历史无关, γ_0 又只依赖于应力应变历史,而与作用剪应力的方向几乎无关,但随剪应力方向的变化而变化.随剪应力循环次数的增加而增大,是液化后大变形的主要组成部分.根据试验曲线的特点可将液化后尾矿粉土的应力应变关系分为三个阶段.

表 1 尾矿粉土动三轴试验方案

Table 1 Dynamic triaxial test scheme of tailings silt

试验编号	试验条件		
	围压 kPa	相对密度 %	加载速率 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
1 [#]	100	35	1.0
2 [#]	100	50	1.0
3 [#]	100	65	1.0
4 [#]	100	80	1.0
5 [#]	200	50	0.25
6 [#]	200	50	0.5
7 [#]	200	50	1.0
8 [#]	200	50	2.0
9 [#]	200	50	4.0
10 [#]	300	50	1.0
11 [#]	400	50	1.0

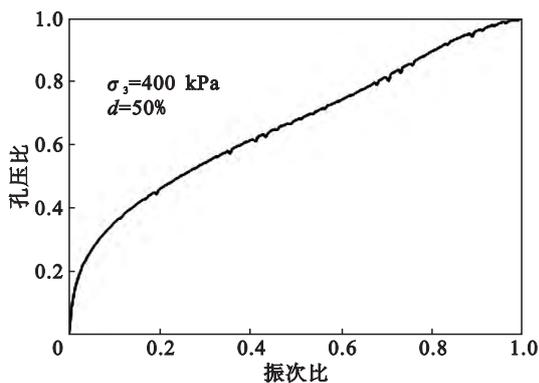


图 3 液化过程中的孔压增长曲线

Fig. 3 Curve of pore water pressure in liquefaction process

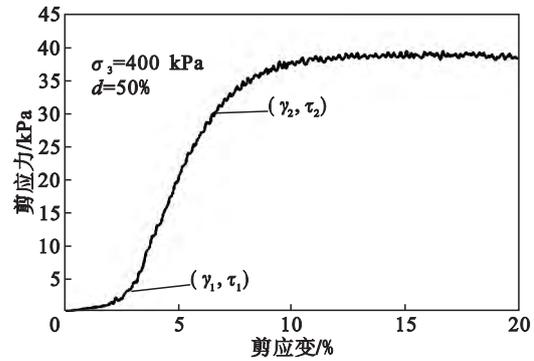


图 4 液化后的应力应变关系

Fig. 4 Post-liquefaction stress-strain relationship

1) 近零有效应力状态阶段: 该阶段曲线为下凹形状,剪应变从零发展到 γ_1 ,剪应力则增长很少,剪应力值 τ_1 为接近于零的数.

2) 应力增长阶段: 该阶段曲线形状为直线,剪切变形继续发展,剪应变从 γ_1 增长到 γ_2 ,剪应力从 τ_1 增加到 τ_2 .

3) 流动变形稳定发展阶段: 该阶段曲线为上凸形状,剪应力发展到最大值且保持稳定,不再随剪应变的变化而变化.

2.2 围压对液化后应力应变关系的影响

如图 5a 所示,围压对液化后的应力应变关系影响较大,尤其是对应变分界值 γ_1 , γ_2 和最大剪应力的影响; 其主要规律如下: ①随着围压的增加,各变形阶段之间的应变分界值 γ_1 , γ_2 均相应增加; ②随着围压的增加,液化尾矿粉土的最大剪应力不断提高,当围压从 100 kPa 增加到 400 kPa 时,相应的最大剪应力从 30 kPa 提高到 140 kPa,最大剪应力增幅有变大的趋势; ③不同围压下,在剪应力增长阶段曲线斜率相同,即应力增速相同.

2.3 相对密度对液化后应力应变关系的影响

如图 5b 所示,相对密度对尾矿粉土的液化后变形特性同样有着显著的影响,其影响规律如下: ①随着相对密度的增加,最大剪应力相应增加,且增幅不断扩大; ②随着相对密度从 35% 增加至 80%,零有效应力状态阶段逐渐收窄,应变分界值 γ_1 从 4% 减少到 1%; ③随着相对密度的增加,应力增长阶段的剪应力增速相应增大,表明相对密度变大使得尾矿粉土的剪切模量增大.

2.4 加载速率对液化后应力应变关系的影响

如图 5c 所示,随着液化后静加载速率的增大,应变分界值 γ_1 不断减小,最大剪应力之间相差不大,且无明显的规律,考虑到可能存在制样的误差,可认为加载速率对尾矿粉土的液化后变形特性影响不大.

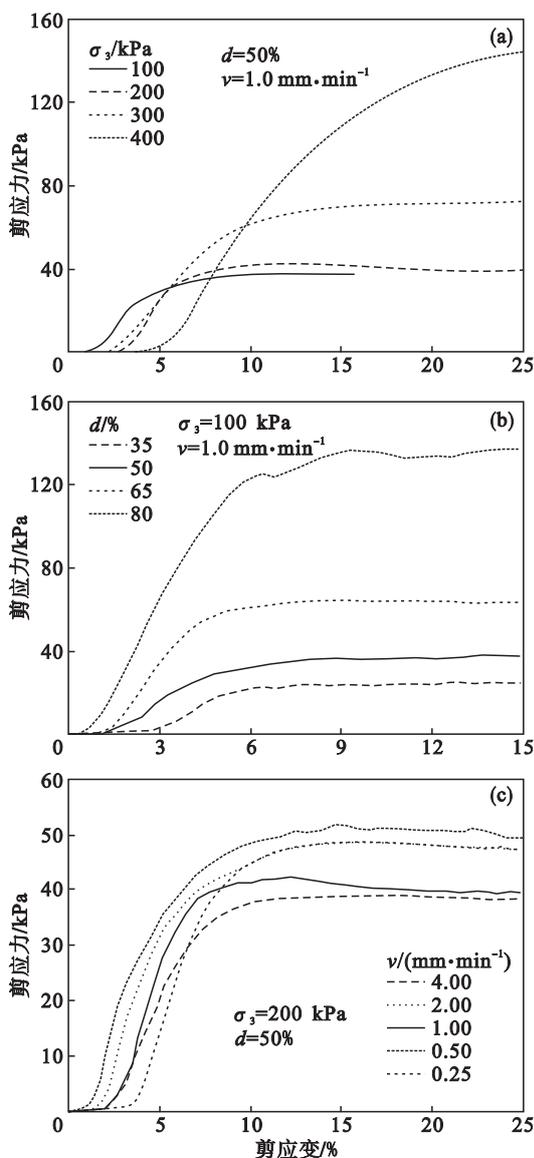


图 5 各因素对应力应变关系的影响
 Fig. 5 Influence of individual factors on stress-strain relationship
 (a) 一围压; (b) 一相对密度; (c) 一加载速率.

2.5 液化后静力加载过程中的孔压消散特点

图 6a 为相对密度对孔压消散的影响曲线: 随着相对密度的增大孔压下降明显, 保持围压为 100 kPa 相对密度为 35% 时稳定孔压可降低至 90 kPa, 而当相对密度增加至 80% 时稳定孔压降低至 5 kPa 的水平, 导致该现象的主要原因是由于随着相对密度的增大, 尾矿粉土的剪胀作用更加明显, 曲线中孔压开始降低点对应的剪应变也有减小的趋势.

图 6b 为围压对孔压消散的影响曲线, 可见在不同围压下液化加载过程中孔隙水压力均有一定程度的下降, 最终稳定的孔压比介于 0.7 ~ 0.9 之间.

图 6c 为加载速率对孔压消散的影响曲线, 可以看出, 围压保持为 200 kPa, 由于尾矿粉土渗透性较差, 液化后未加载时初始孔压一般略高于围压, 加载初期孔压保持不变, 孔压稳定后其孔压比在 0.8 ~ 0.9 之间, 并未出现砂土液化后加载试验中孔压比降为零甚至负值的现象, 原因可能是由于砂土的剪胀性大于尾矿粉土, 剪切力作用下孔压下降更明显. 对比图 5c 和图 6c, 根据有效应力原理可以发现, 随着孔压的下降, 试样从零有效应力状态进入非零有效应力状态, 孔压下降与剪应力增加基本保持同步.

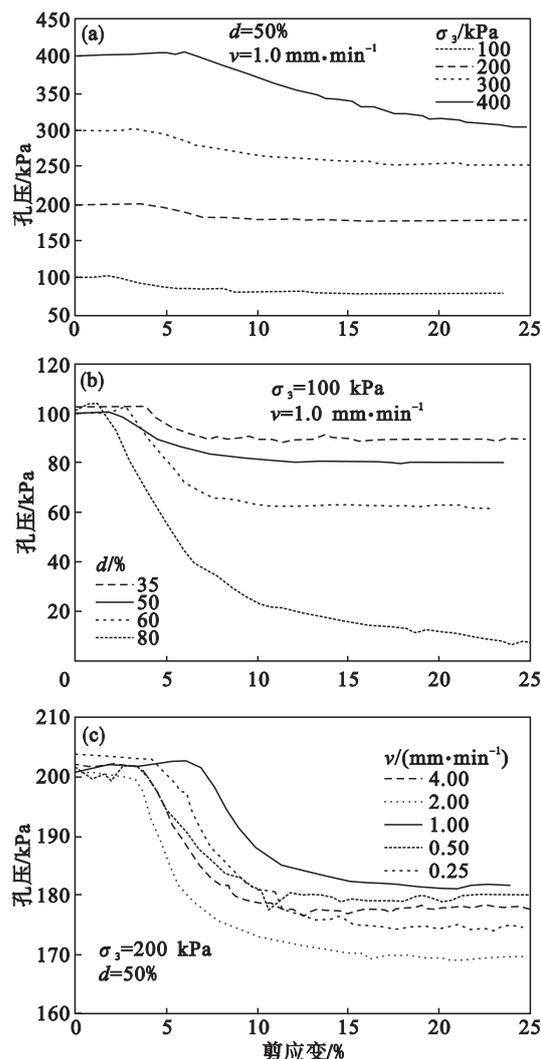


图 6 各因素对孔压消散特性的影响
 Fig. 6 Influence of individual factors on pore water pressure dissipating
 (a) 一围压; (b) 一相对密度; (c) 一加载速率.

3 液化尾矿粉土的本构模型

Yasuda 和刘汉龙等^[5,7]将液化砂土的变形特性分为零有效应力段和非零有效应力段, 分别提

出了双直线模型和双曲线模型,这两种模型都是两阶段模型,仅能够描述零有效应力和应力增长两个阶段,未考虑流动变形阶段;徐斌等^[12]提出的砂砾料液化变形三直线模型虽包含了液化后变形的全过程,但直线型模型过于简化,认为阶段间变形发生突变,而非渐变,与实际情况不符。

为解决上述模型在描述尾矿粉土液化后变形特性方面存在的不足,根据液化后尾矿粉土再加载过程的应力应变曲线特点,本文提出了一个 S 型曲线形式的三参数渐变模型,可表示为

$$\tau = a - \frac{a}{(1 + \gamma/b)^m} \quad (4)$$

式中: τ 为剪应力; γ 为剪应变; a, b, m 为试验参数. 图 7 为本文模型与双曲线模型及三直线模型比较,对比结果表明,本文模型既能够描述尾矿粉土液化变形的渐变特性又能够表达其流动变形阶段的特征,有效弥补了前人研究成果的不足。

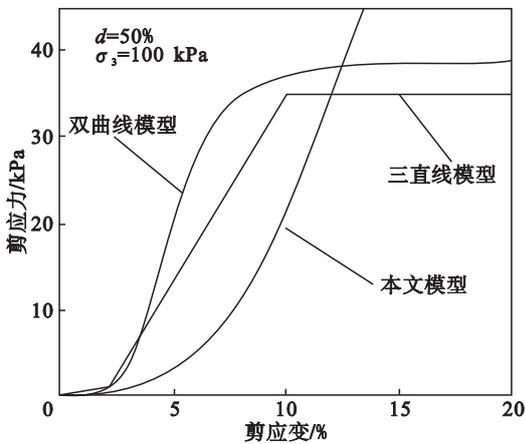


图 7 三种液化后变形模型比较
Fig. 7 Comparison of three post-liquefaction deformation models

根据以上的试验研究发现:液化后的加载速率对尾矿粉土的应力应变关系影响不大,其液化后变形性质主要受相对密度和围压的影响,利用式(4)对试验结果进行拟合,拟合曲线相关性系数 R^2 均可达到 0.98 以上,典型的试验数据拟合曲线如图 8 所示,具体的参数计算结果见表 2。

由计算结果可知:参数 a 与最大剪应力相接近,为模型的极限剪应力值,主要受试样相对密度和围压影响; b 与 m 参数值离散性较小,与相对密度和围压的相关性并不明显, b 值一般介于 2 ~ 11, m 值介于 2 ~ 5. 图 9 为相对密度、围压对参数 a 的拟合曲线,由图可知围压和相对密度对参数 a 的影响可用指数函数表示,且相对密度对参数 a 的影响要大于围压的影响。

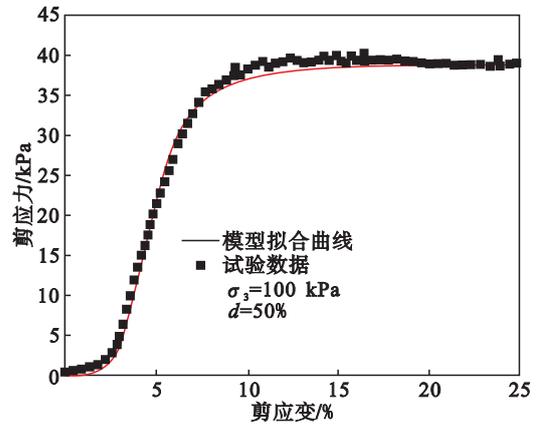


图 8 典型的试验数据及拟合曲线
Fig. 8 Typical test data and fitting curve

表 2 模型参数拟合结果
Table 2 Fitting results of model parameters

试验编号	参数拟合结果			
	a	b	m	R^2
1#	24.6	4.1	4.9	0.987
2#	37.2	3.2	3.2	0.994
3#	63.3	2.8	4.1	0.995
4#	140.0	3.1	2.8	0.997
7#	40.8	4.4	5.4	0.988
9#	72.1	6.1	3.8	0.998
10#	151.0	11.1	3.5	0.997

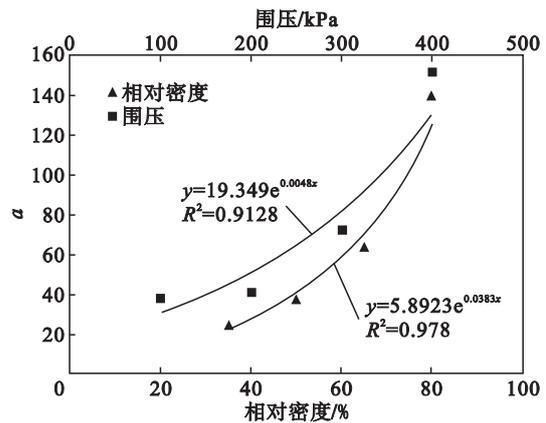


图 9 相对密度和围压与参数 a 的关系
Fig. 9 Influence on parameter a of relative density and confining pressure

4 模型验证

为验证上述模型的适用性,进行验证性试验.如图 10 所示,两条曲线分别为 $d = 50%$, $\sigma_3 = 500$ kPa, 以及 $d = 90%$, $\sigma_3 = 100$ kPa 工况下进行加载的试验结果:最大剪应力分别为 203 kPa, 181 kPa; 根据式(4)预测的 a 值分别为 212, 185;

预测值与试验结果的误差分别为 4.4% 和 2.3%。模型拟合参数见表 3, b 值和 m 值均在预测范围内。

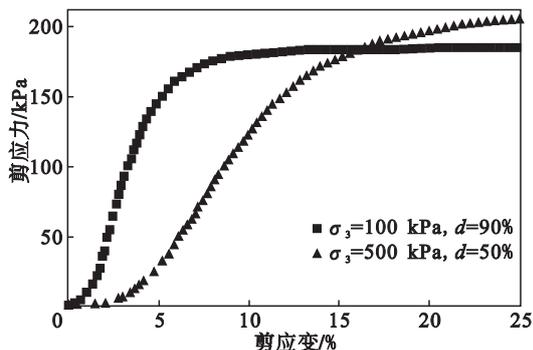


图 10 验证性试验结果

Fig. 10 Result of further proven experiments

表 3 验证性试验模型参数

Table 3 Model parameters of further proven experiments

试验工况	模型参数			
	a	b	m	R^2
$d = 50\%$ $\sigma_3 = 500$ kPa	203	9.1	3.2	0.948
$d = 90\%$ $\sigma_3 = 100$ kPa	181	3.2	2.9	0.957

5 结 论

1) 尾矿粉土液化后加载过程的变形特性可分为三个阶段: 近零有效应力状态阶段、应力快速增长阶段、流动变形稳定发展阶段。

2) 固结围压、相对密度对尾矿粉土的液化后流动变形特性影响明显, 而加载速率的影响较小。

3) 尾矿粉土的液化后再加载过程, 最终的稳定孔压比介于 0.7 ~ 0.9 之间, 相对密度对孔压消散过程的影响大于围压的影响。

4) 可用一个三参数模型描述尾矿粉土液化后的变形特性, 验证性试验和模型对比表明该模型具有良好的适用性。

参考文献:

[1] Ishihara K. Liquefaction and flow failure during earthquakes [J]. *Geotechnique*, 1993, 43(3): 351-451.

[2] Hamada M, Yasuda S, Isoyama R, et al. Observation of permanent ground displacements induced by soil liquefaction [C]//Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Yotsuya: JSCE, 1986: 211-220.

[3] Bartlett S F, Youd T L. Empirical prediction of liquefaction-induced lateralspread [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(4): 316-329.

[4] Tokimatsu K, Yoshimi Y. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPTN2 value and finescontent [J]. *Soils and Foundations*, 1983, 23(4): 56-74.

[5] Yasuda S, Yoshida N, Masuda T, et al. Stress-strain relationships of liquefied sands [C]//Proceedings of the 1995 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Rotterdam, 1995: 811-816.

[6] 顾宝和, 张荣详, 石兆吉. 地震液化效应的综合评价 [J]. *工程地质学报*, 1995, 3(3): 1-10. (Gu Bao-he, Zhang Rong-xiang, Shi Zhao-ji. Comprehensive assessment of seismic liquefaction effects [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1995, 3(3): 1-10.)

[7] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(2): 142-146. (Liu Han-long, Zhou Yun-dong, Gao Yu-feng. Study on the behavior of large ground displacement of sand due to seismic liquefaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 142-146.)

[8] 陈育民, 刘汉龙, 邵国建, 等. 砂土液化及液化后流动特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(9): 1408-1413. (Chen Yu-min, Liu Han-long, Shao Guo-jian, et al. Laboratory tests on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(9): 1408-1413.)

[9] 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 & Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 35-40.)

[10] 高艳平, 王余庆, 辛鸿博. 尾矿坝地震液化简化判别法 [J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 72-79. (Gao Yan-ping, Wang Yu-qing, Xin Hong-bo. A simplified procedure for evaluating liquefaction potential of tailing dam [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 72-79.)

[11] 刘磊, 张红武, 钟德钰, 等. 尾矿库漫顶溃坝模型研究 [J]. *水利学报*, 2014, 45(6): 675-681. (Liu Lei, Zhang Hong-wu, Zhong De-yu, et al. Research on tailings dam break due to overtopping [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(6): 675-681.)

[12] 徐斌, 孔宪京, 邹德高, 等. 饱和砂砾料液化后应力与变形特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 103-106. (Xu Bin, Kong Xian-jing, Zou De-gao, et al. Laboratory study on behavior of static properties of saturated sand-gravel after liquefaction [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 103-106.)