

饱和粉土液化后变形特性试验研究

刘汉龙¹, 曾长女², 周云东¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 河南工业大学 土木建筑学院, 郑州 450052)

摘 要: 利用多功能静动液压剪切三轴仪, 进行了一系列饱和粉土液化后变形特性试验, 研究了干密度和液化程度对粉土液化后变形特性的影响, 并考虑试验动加载前小幅预振和不规则动加载对粉土液化后变形特性的影响。试验结果表明, 液化后变形可由两段应变 ε_0 和 ε_d 组成。干密度越小, ε_0 越大, ε_d 段剪切模量越低; 液化越严重 ε_0 越大, 不同液化程度对 ε_d 段剪切模量影响很小; 动加载前小幅预振和不规则动加载对液化后变形影响较小。提出了饱和粉土液化后变形模型, 给出了模型参数的推导。验证结果表明, 该模型的计算值与试验值吻合较好, 说明该模型能很好地描述这种变形行为。

关 键 词: 粉土; 液化后; 室内试验; 应力-应变关系

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Test study on post-liquefaction deformation behavior of silt ground

LIU Han-long¹, ZENG Chang-nü², ZHOU Yun-dong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A series of tests have been conducted to simulate post-liquefaction behavior of silt in a new universal triaxial torsional shear apparatus of Hohai University. Such effects on post-liquefaction of silt as soil dry density, severity of liquefaction, pre-vibration, non-regular vibration are discussed. It is found that post-liquefaction strain is composed of ε_0 and ε_d . The bigger dry density is the larger ε_0 and the larger shear modulus are during the stage of ε_d . The more serious of liquefaction is, the larger ε_0 is. But there is no difference of shear modulus during the stage of ε_d , when severity of liquefaction change. The pre-vibration and non-regular vibration affects slightly on post-liquefaction stress-strain relationship. A new post-liquefaction model of liquefied silt is proposed based on test results. And how to obtain parameters of the model is also introduced. The results predicted by the proposed method are consistent well with the experiment observation.

Key words: silt; post-liquefaction; lab test; stress-strain relationship

1 引 言

液化引起的地面大位移对结构的破坏正越来越被重视^[1], 但研究成果主要集中在净砂上, 实际场地中常常含有一定的细粒成分, 如粉土。粉土是一种具有特殊工程性质的土, 它属于低塑性土, 塑性指数 $I_p \leq 10$, 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过全重 50 %。粉土具有特殊的颗粒组成, 由砂粒、粉粒、黏粒 3 种粒种组成, 其比表面积不大, 但毛细现象活跃。根据粉土成因不同, 可以分为冲积粉土、洪积粉土、坡积粉土和残积粉土 4 种类型^[2]。

不同成因类型的粉土有其各自的物理力学性质, 但在地震作用下, 粉土容易发生液化^[3]。我国海城、唐山地震时, 饱和粉土地基发生了液化现象,

唐山 7.8 级大地震引起陡河、滦河、蓟运河、海河故道及月牙河等河岸滑移、地裂、喷砂, 滑移带宽约 100~150 m; 造成唐山胜利桥、越河桥、汉沽桥等 10 余座公路和铁路桥长度缩短 (最大达 9.1 m)、桥台倾斜、桥墩折断落梁、河道变窄; 导致天津毛巾厂、天津钢厂等单位数十栋房屋拉断或倒塌、开裂。在国外 Tokachi-oki 地震中, 黏粒含量达 18 %、粉粒含量为 72 % 的粉质土都发生了液化现象, 而人们通常认为, 低塑性粉质黏土和黏质粉土不会发生液化, 这种矛盾促使学者开始研究细粒土地震荷载下的变形特性。

唐山地震后, 石兆吉^[3]等提出了一些考虑黏粒含量影响的液化判别式, 但这些判别式基本由砂土液化判别式修正而来。Seed 等 (1985 年)^[4]、Youd

和 Idriss 等^[5]（2001 年）相继开展了细粒含量对砂土液化影响研究，取得了很多有益的成果。衡朝阳^[6]、牛琪瑛等^[7]、阮永芬等^[8]通过试验研究了黏粒含量对粉土抗液化强度的影响及粉土的若干动力性质。黄博^[9]考虑了粉土结构性影响，全方位地研究了粉土的动力性质。然而，几乎所有的研究都集中在粉土液化方面，对粉土液化后特性尚未见进行系统研究；另一方面，粉土特殊的颗粒组成必然造成其液化后特性与砂土有所差别，因此，有必要进行系统的粉土液化后特性的室内试验，以进一步研究粉土液化后的变形机制。

2 试验仪器及试样制备

2.1 试验仪器

试验所用仪器为河海大学岩土所与日本圆井株式会社共同研制的多功能静动液压三轴仪^[10]。该仪器由计算机控制部分、伺服控制单元、量测单元、压力及加载系统、三轴室及附属部分组成。该仪器的性能指标如下：试样尺寸包括 3 种，分别为实心样 $\phi 61.8\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ 和 $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，空心样 $\phi 60\text{ mm} \times \phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ；振动频率为 $0.01 \sim 5\text{ Hz}$ ；最大竖向荷载为 30 kN ；最大围压为 1 MPa ；最大反压为 0.6 MPa ；轴向最大变形为 $-50 \sim 50\text{ mm}$ ；振动波为正弦波或随机波。

按不同的试验要求控制试验方式，试验过程可从一种控制方式方便地切换到另一种控制方式。这也是有别于目前常用仪器的优点，为进行液化后试验研究提供了有利条件。试验数据由计算机自动采集，并生成相应的数据文件。

本次试验采用试样尺寸为 $\phi 61.8\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ ，振动频率为 0.05 Hz ，试验按照应力控制的方式进行。

2.2 土样性质、制备

试验所用粉土取自杭州一千岛湖高速公路西湖区段，取土埋深约 5 m 左右。土样取出后，立即蜡封，贴上标签，标明上下。但是在运输过程中，土样扰动较大，天然状态下的物性指标不好控制。因此，试验所用粉土采用重塑粉土，土样基本物理性质指标如表 1。粉土的级配曲线见图 1，级配常数如表 2 所示。

表 1 粉土物理性质指标 Table 1 Physical property indexes of silt			
土粒比重	塑限 / %	液限 / %	塑性指数
2.65	25.50	32.80	7.3

表 2 粉土级配常数 Table 2 Gradation parameters of silt					
D_{60} / mm	D_{50} / mm	D_{30} / mm	D_{10} / mm	$C_u = D_{60}/D_{10}$	$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}}$
0.038	0.034	0.025	0.01	3.80	1.42

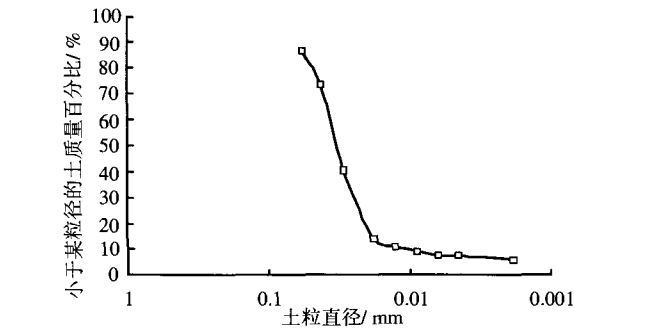


图 1 粉土颗粒大小分布曲线
Fig.1 Grain diameter distribution curve

试验采用直径为 61.8 mm ，高度为 140 mm 的试样。粉土样分 7 层捣实，根据土样的干重度及预先设计的含水率确定每层土样的重量，击实到相应高度，各层接触面刮毛，以保证上下层接触良好。土样制备完后放到饱和器内抽真空饱和，饱和时间大于 24 h 。土样饱和后需要进行孔隙水压力检测，记孔隙水压力和侧压力的比值称为孔隙水压力系数 B 。增加各向均等压力 $\Delta\sigma_0$ ，然后测定孔隙水压力增量 Δu 值，得到 $B = \Delta u / \Delta\sigma_0$ 。若 $B < 0.95$ ，则认为试样饱和度不能满足要求，仍需继续施加反压饱和，直至 $B \geq 0.95$ 时才满足要求。

3 试验结果

本次试验试样在各向等压条件下固结，然后在不排水条件下施加动荷载，使试样达到预定的液化效果，最后在不排水条件下施加一定速率的单调荷载进行液化后不排水剪试验，试验过程试样的受力情况如图 2 所示。

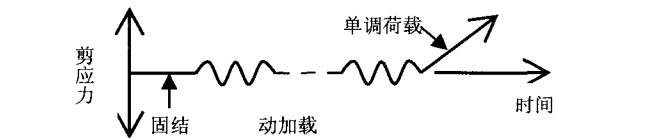


图 2 动加载及静加载过程
Fig.2 Procedure of cyclic loading and monotonic loading

试验采用应力控制方式进行，主要进行了 3 组共 30 个不同干密度试样在不同液化状态下的试验，同时考虑了预振和不规则荷载对于液化后变形的影响。试验结果如图 3 所示。

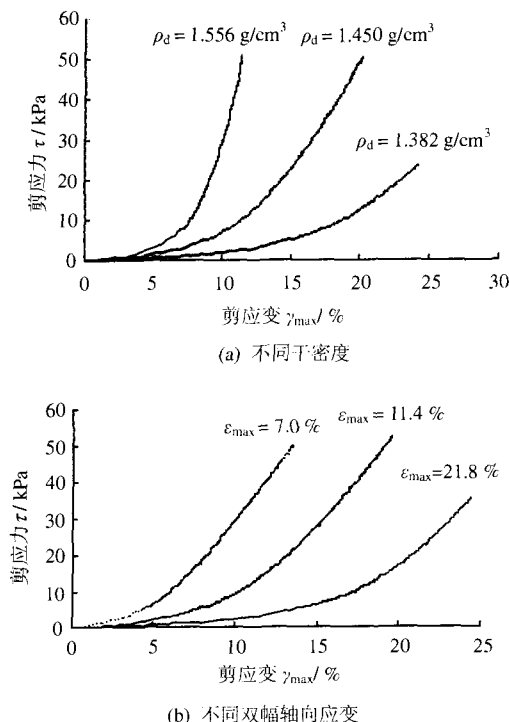


图 3 粉土液化后应力-应变关系

Fig.3 Post-liquefaction stress-strain relationship of silt

从图中可以看出,液化后粉土有 3 个不同的变形阶段,但是如果从分析应变的角度,可以将其分为 2 个主要阶段:

(1) 在静荷载加荷初期,模量从几乎为 0 发展到模量达到一个较小值,这个阶段其实包括变形的 2 个小阶段,即:轴向应变以较大的速率增加,应力几乎为 0。土体几乎处于 0 刚度区,该阶段发生的最终位移称为参考剪应变 γ_0 (γ_0 取图中 $\tau=2$ kPa 时的值);随着应变的继续增加,应力迅速增加,土体的刚度逐渐增大。

(2) 土体进入一个稳定变形区,此时剪切模量基本保持为常量,应力-应变关系表现为简单的线性关系。

分析图 3 可以看出,液化前粉土模量随着应变增加而减少,而液化后粉土模量随应变增加而增加,不过模量增加的速率在应变发展过程中有很大的差异,模量从 0 开始逐渐增加,然后有一个快速增长区,直到达到稳定不变区。液化粉土这一特殊的应力-应变关系,宏观上表现为单调荷载加载阶段,土体始终表现为剪胀特性,孔压有足够的下降空间。因此,有效应力不断增加,即土体强度得到恢复,这一观点在图 3 中也得到反映。

4 基于试验的液化后粉土本构关系推导

虽然不同的条件下粉土液化后应力-应变关系

有所不同,但是 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 有很好的关系,文中 ε_0 , ε_{\max} 与 γ_0 , γ_{\max} 对应,两者相差同一个常数。具体分析结果如图 4 所示。

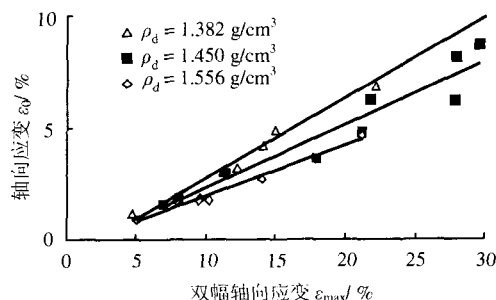


图 4 不同干密度粉土试样 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 关系

Fig.4 Relationship between ε_0 and ε_{\max} for samples of different densities

由图 4 分析可得到:

$$\frac{d\varepsilon_0}{d\varepsilon_{\max}} = C \quad (1)$$

进而可以推出:

$$\varepsilon_0 = C(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\text{entry}}) \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{\text{entry}}$ 为门槛应变值; ε_{\max} 为动加载下双幅轴向应变; C 为常数; ε_0 为静加载阶段应力很小 (小于 2 kPa) 时对应的轴向应变值。由图 5 知,可对于不同干密度粉土取 $\varepsilon_{\text{entry}} = 1.9\%$ 。

C 是一个与干密度相关的常数,干密度与 C 的关系如图 6 所示。

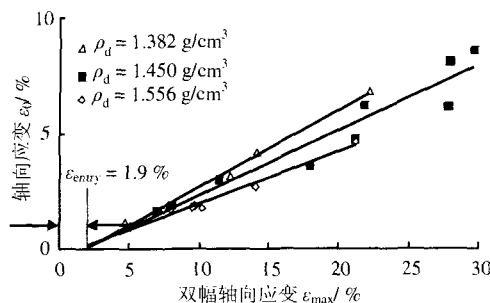


图 5 系数 $\varepsilon_{\text{entry}}$ 的确定

Fig.5 Determination of coefficient $\varepsilon_{\text{entry}}$

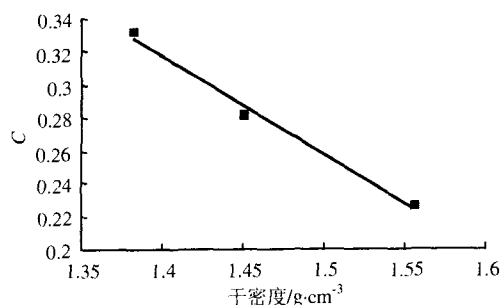


图 6 系数 C 与干密度的关系

Fig.6 Relationship between coefficient C and density

进行线性拟合得到:

$$C = -0.6\rho_d + 1.2 \quad (3)$$

本文还考虑了不规则动荷载以及试样经过小幅预振后 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 关系的影响, 不规则动荷载通过施加一组变换频率和动荷载大小来模拟。预振是在试样固结完毕, 施加排水条件下的小幅动荷载(1 000 s), 再继续固结, 固结之后进行和未预振同样的试验。不规则动荷载如图 7 所示, 试验结果如图 8 所示。

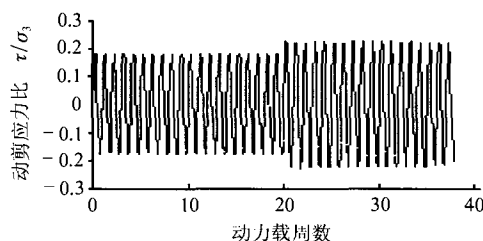


图 7 不规则动加载形式

Fig.7 The pattern of irregular cyclic loading

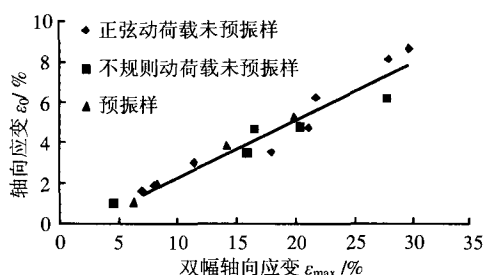


图 8 经过预振及不规则动荷载条件下的 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 关系

Fig.8 Relationship between current ε_0 and preceding ε_{\max} for samples of subjected to cyclic loading with constant or irregular amplitude

从图 8 可知, 施加不规则动荷载与施加正弦的规则动荷载得到的 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 关系的数据有较好的一致性。比较同一干密度粉土样经过小幅预振和未经过预振的 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 关系, 发现预振对于试验数据的影响很小。因此, 不规则动荷载和预振对于粉土 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 的影响都很小。

以上分析了液化后粉土静加载段产生位移较大而应力很小阶段的位移, 这个阶段产生的位移与有效应力无关。液化后粉土还要经历一段应力恢复阶段, 由试验结果图 9 拟合分析得到这个阶段产生的位移与有效应力相关。所以, 有:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_d = \varepsilon_0 = C(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\text{entry}}) + \frac{K}{C} \left(\frac{q}{M_{cs} p'_i} \right)^A \quad (4)$$

式中: $C, K, \varepsilon_{\text{entry}}, A$ 分别由试验得到, 由有效应力

路径 $q = M_{cs} p'_i$ 得到 M_{cs} 。

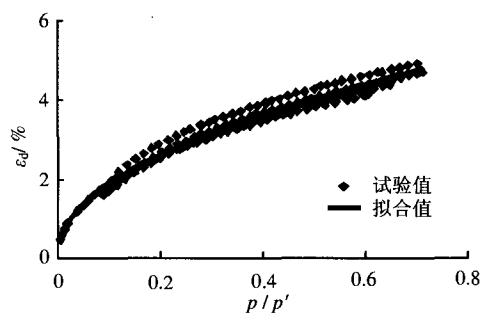


图 9 参数 K, A 的确定

Fig.9 Determination of parameters K, A based on the test data

5 模型验证

为了验证本文模型的适用性, 对某一干密度试样进行验证。验证 $\rho_d = 1.556 \text{ g/cm}^3$ 试样时, $C = 0.266, K = 1.50, A = 0.4746$ 。试验验证结果如图 10 所示。验证结果表明, 试验值与计算值吻合较好, 液化后初始段和强度恢复段拟合得较好, 而在两者过渡段拟合得较差, 但这并不影响整体液化后变形的计算结果。然而, 由于目前相关粉土液化后特性研究成果较少, 该模型有待进行更广泛地验证和进一步修正。

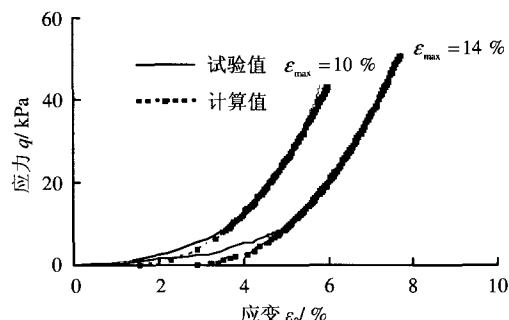


图 10 液化后应力-应变试验值和模型计算值对比

Fig.10 Comparison between predicted data from model and experimental observation

6 结 语

对不同干密度粉土试样液化后变形试验, 并根据试验结果分析得到粉土液化后变形模式, 该模式主要考虑了不同干密度对液化后变形的影响, 讨论了模型中参数计算方法及试验方法, 同时考虑了不规则荷载和小幅预振对粉土液化后变形的影响。试验结果验证表明, 该模型与试验数据吻合得较好。当然该模型还有待进一步验证和改进。

参考文献

- [1] 刘惠珊, 徐凤萍, 李鹏程. 液化引起的地面大位移对工程的影响及研究现状[J]. 特种结构, 1997, 14 (2): 47—50.
- [2] 林本海, 李业茂. 粉土工程性质的探讨[A]. 中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京: 万国学术出版社, 1999. 181—184.
- [3] 石兆吉, 郁寿松, 王余庆, 等. 饱和轻亚黏土地基液化可能性判别 [J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4 (3): 71—81.
SHI Zhao-ji, YU Shou-song, WANG Yu-qing, et al. Prediction of liquefaction potential of saturated clayed silt[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1984, 4(3): 71—81.
- [4] Seed H B, Tokimatsu K, Harder L F, et al. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1985, 111(12): 1 425—1 445.
- [5] Youd T L, Idriss I M, Andrus R D, et al. Liquefaction resistance of soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2001, 127 (10): 817—833.
- [6] 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 clayed sand[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(4): 339—344.
- [7] 牛琪瑛, 裘以惠, 史美筠. 粉土抗液化特性的试验研究 [J]. 太原工业大学学报, 1996, 27(3): 5—9.
NIU Qi-ying, QIU Yi-hui, SHI Mei-yun. The study and test of liquefaction resistant characteristics of silt [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 1996, 27(3): 5—9.
- [8] 阮永芬, 巫志辉. 饱和粉土的若干动力特性研究 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 100—106.
RUAN Yong-fen, WU Zhi-hui. Some dynamic properties of saturated sandy loam [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17 (4): 100—106.
- [9] 黄博. 粉土和粉砂的动力特性及地震液化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [10] 刘汉龙, 周云东, 余湘娟, 等. 多功能静动三轴仪研制及在液化后大变形中的应用 [J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 48—51.
LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, YU Xiang-juan, et al. Design of static-dynamic dual purpose triaxial compression test apparatus and application in the study of earthquake-induced large deformation [J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 2001, 25(5): 48—51.

欢迎订阅 2008 年《岩土力学》

《岩土力学》是全国中文核心期刊、美国《工程索引》(EI) 收录期刊, 同时也是中国科学引文数据库、中国科技论文统计源期刊, 且为《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《万方数据库》、重庆维普全文收录, 欢迎读者通过各期刊网查阅本刊内容。本刊主要报道岩土力学与工程研究和工程获得的新理论、新成果、新方法, 主要内容有: 岩土力学与岩土工程研究、典型工程实录、测试技术与测试方法、学术讨论、学术与工程动态、学术讲座等。

本刊为月刊, 大 16 开本, 每期页码为 240 页, 每月 10 日出版, 国内、外公开发行。每期定价 28 元, 全年定价 336 元。本刊邮发代号: 38-383, 同时自办发行, 国外订户可通过中国国际图书贸易总公司订阅。编辑部电话: 027-87198484。

直接在本编辑部订阅, 付款方式有两种:

(1) 邮局汇款: 430071 湖北武汉市小洪山中国科学院武汉岩土力学研究所, 收款人: 《岩土力学》编辑部, 请注明 2008 年《岩土力学》刊款, 并将订户详细通讯地址、电话、订阅份数等信息发 E-mail 至 ytlx@whrsm.ac.cn 或邮寄到编辑部。

(2) 银行汇款: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 帐号: 854938010261014328, 开户行: 中国建设银行武汉市科学院支行, 注明: 2008 年《岩土力学》刊款。

收到订刊款后, 编辑部将根据订户提供的通讯地址及时寄给发票, 并按时寄刊。请订户务必写清邮政编码、详细的通讯地址, 联系电话及 E-mail 地址。