

DOI: 10.11779/CJGE201501013

饱和砂土液化后流体本构模型研究

周恩全¹, 王志华^{1, 2}, 陈国兴^{1, 2*}, 吕丛¹

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 南京工业大学城市地下空间研究中心, 江苏南京 210009)

摘要: 利用空心圆柱扭剪仪开展了饱和南京细砂液化后常速率加载试验, 考虑了有效固结压力和加载速率对饱和南京细砂液化后流体特性的影响, 结果表明: 液化后静加载过程中剪应力与孔压比的发展具有明显的二阶段特性, 且剪应力与孔压比的发展有着良好的线性相关关系, 有效围压及加载速率对二者的关系有着明显影响; 据此提出一种符合液化后静加载过程的率相关性及孔压相关性流体本构模型, 该模型将构成饱和砂土强度的土颗粒摩阻力与土-水黏滞阻力分别表示为时变型和非时变型剪切稀化流体; 最后进行了该模型的验证性试验, 并将模型预测结果与其他学者研究成果对比, 验证试验及对比结果均表明该模型具有较好的适用性。

关键词: 孔压; 加载速率; 本构模型; 剪切稀化流体

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0112-07

作者简介: 周恩全(1986-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事土动力学和岩土地震工程研究。E-mail: enquan1986@126.com。

Constitutive model for fluid of post-liquefied sand

ZHOU En-quan¹, WANG Zhi-hua^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}, LÜ Cong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Research Center of Urban

Underground Space, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The static load tests on post-liquefied saturated Nanjing fine sand are carried out using the hollow cylinder apparatus. The effect of the initial effective confining pressure and loading rate on the fluid characteristics of post-liquefied saturated Nanjing fine sand is taken into account. The results show that the development process of the shear stress and pore water pressure ratio have obvious two-stage characteristics in static loading process, and they have a good linear relationship. The effective confining pressure and the static loading rate have obvious influence on the relationship between them. On this basis, a constitutive model for fluid with rate and pore water pressure-dependent static loading process is proposed. In this model the friction resistance between soil particles and the viscous resistance between soil and water are respectively expressed as the thixotropic shear-thinning fluid and non-time-variant shear-thinning fluid. Finally, experiments and comparisons between the predicted curves and other researchers' test results are carried out, indicating that the proposed constitutive model has good applicability.

Key words: pore water pressure; loading rate; constitutive model; shear thinning fluid

0 引言

地震作用下的砂土液化一直是岩土地震工程领域重点研究的课题之一。1983年日本 Nihonkai-Chubu 地震中的土体液化大变形导致了大量桥梁、地下结构等构筑物的破坏^[1], 自此土体的液化大变形越来越引起学者的重视, 而液化后大变形引起地上结构的倒塌、倾斜、不均匀沉陷、道路开裂, 地下结构上浮、破裂、基础破坏, 堤坝滑移、山体滑坡等地震和地质灾害也在近年来历次地震中屡见不鲜, 1999年土耳其 Adana-Ceyhan 地震^[2]、1999年土耳其 Kocaeli 地震^[3]和台湾 Chi-Chi 地震^[4]、2011年东日本大地震^[5]等地震

都存在大量因为液化大变形导致的地震震害。

对于液化后大变形问题的研究, 一种较新颖的思路是引入流体力学的观点, 将液化后的土体视为流体, 将应力与应变率关系或表观黏度等流体属性赋予液化后的土体, 通过流体力学手段来分析和预测砂土液化大变形。自1992年 Towhata 等^[6]首次利用流体力学方

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301);
国家自然科学基金项目(51378257); 江苏省自然科学基金项目(BK2011802)

收稿日期: 2014-04-29

*通讯作者

法来预测土体的液化大变形, 流体力学法愈来愈引起学者注意, 然而流体力学法在运用的过程中仍然存在不可忽视的缺陷, 这种缺陷主要体现在液化后土体流体性质的确定上。目前液化土体的流体性质主要有两类方法来考虑: ①根据人为经验来定义液化后土体的流体性质, 比如 Uzuka 等^[7]、Hadush 等^[8-9]在预测液化后土体的液化变形及其液化效应时人为定义了其流体性质, 显然这种方式是有待商榷的。②利用试验手段研究液化土体流体性质, 比如 Kawakami 等^[10]利用黏度计, Huang 等^[11]利用三轴试验得到了初始液化后的土体的表观黏度与剪应变率具有一定的对应关系; Sawicki 等^[12]分别利用三轴试验和振动台试验, Towhata 等^[13]、Tamate 等^[14]、Dungca 等^[15]利用拖管试验得到了初始液化后表观黏度数量级; 刘汉龙等^[16]通过液化后扭剪试验, Hwang 等^[17]、陈育民等^[18]通过拖球试验, 王志华等^[19]通过振动台试验得到了饱和土体的表观黏度与剪应变率及孔压比均有一定的相关性。

孔压相关性和率相关性是将液化土体视为流体不可避免的问题, 然而研究者在研究饱和砂土液化后流体特性的过程中并没有综合考虑剪应变率和孔压比对流体特性的影响, 本文在总结前人的研究经验和不足的基础上, 开展了饱和砂土液化后不同加载速率的加载试验, 提出了综合考虑孔压相关性及率相关性的本构模型, 并与其他学者的结果做了对比分析。

1 试验概况

1.1 试验设备及模型土

采用的试验设备为 GDS 公司研制的空心圆柱扭剪仪, 通过对底座进行改造, 用直径相同的不锈钢圆板置换空心试样底座中的铜芯透水石, 在不锈钢圆板上开固定螺丝孔和压力孔, 用“O”型橡胶圈隔断反压和内压通道, 实现实心圆柱试样的轴向循环加载三轴试验, 见图 1。



图 1 圆柱扭剪仪试验系统

Fig. 1 Loading system of hollow cylinder apparatus

试验用砂为南京地区典型的片状颗粒细砂, 基本物理参数如下: 不均匀系数 $C_u = 2.31$, 曲率系数 $C_c = 1.07$, 特征颗粒 $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$, 最大孔隙比

$e_{\max} = 1.14$, 最小孔隙比 $e_{\min} = 0.62$, 颗粒密度 $\rho_s = 2.70 \text{ g/cm}^3$ 。南京细砂颗粒级配曲线见图 2。

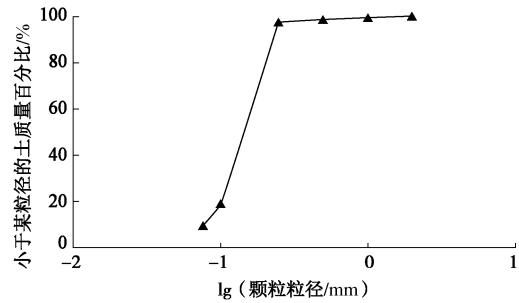


图 2 南京细砂的颗粒级配

Fig. 2 Particle size of Nanjing fine sand

1.2 试验加载方案

试样为实心圆柱试样, 直径 $D = 100 \text{ mm}$, 高度 $H = 200 \text{ mm}$ 。采用干砂分层击实控制相对密实度的方法制样, 根据预设的相对密实度确定每层土样的重量, 分 8 层击实, 击实到相应高度后, 各层接触面刮毛, 以保证上下层接触良好。联合利用通 CO_2 抽真空吸无气水与施加反压等方法进行试样饱和, 确保试样固结前孔压系数 $B \geq 0.98$ 。试样在均等固结条件下固结完成后, 在不排水条件下, 先施加循环轴向荷载, 使试样充分液化, 然后在不排水条件下按预设的应变速率施加静荷载, 加载过程见图 3。

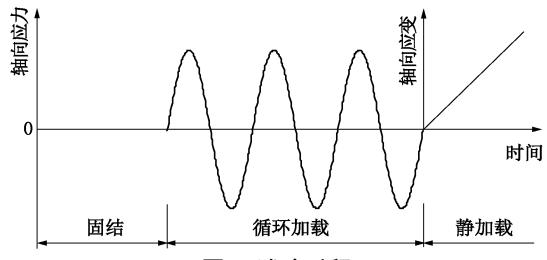


图 3 试验过程

Fig. 3 Test process

本次试验考虑了初始有效围压和轴向加载速率对饱和南细砂液化后特性的影响: ①初始有效围压为 100, 200, 300, 400 kPa; ②加载速率为 5%, 2.85%, 2%, 1.25%, 0.67%, 0.50%, 0.33%, $1.25\% \cdot \text{min}^{-1}$ 。具体试验工况见表 1。

表 1 试验工况

Fig. 1 Summary of loading conditions

工况 编号	有效围压 /kPa	加载速率 /(min ⁻¹)	剪应变率 /(10 ⁻⁵ ·s ⁻¹)
SC1	100	5.00%	122.6
SC2	100	2.85%	69.8
SC3	100	2.00%	49.5
SC4	100	1.25%	31.0
SC5	100	0.67%	16.5
SC6	100	0.50%	12.6
SC7	100	0.33%	8.2
SC8	200	1.25%	31.0
SC9	300	1.25%	31.0
SC10	400	1.25%	31.0

注: 相对密实度为 50%。

根据轴向动三轴试验及液化后轴向加载试验得到的轴向应力 σ 和轴向应变 ε 通过下式转换成剪应力 τ 和剪应变 γ :

$$\tau = \frac{\sigma}{2} , \quad (1)$$

$$\gamma = (1+\nu)\varepsilon , \quad (2)$$

式中, ν 为泊松比, 试验均在不排水条件下进行, 泊松比 ν 取 0.49。

由式(2)得到的剪应变时程, 可以通过下式计算出剪应变发生的速率,

$$\dot{\gamma}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) , \quad (3)$$

式中, $\dot{\gamma}_i$ 为 t_i 时刻的剪应变率, γ_{i-1} , γ_i 和 γ_{i+1} 为时刻 t_{i-1} , t_i 和 t_{i+1} 的剪应变值。即剪应变率, 具体各工况的剪应变率见表 1。

2 试验结果分析

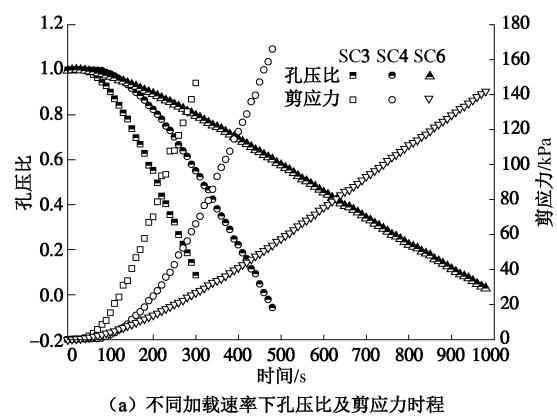
图 4 给出了液化后静加载过程中典型的孔压比和剪应力的发展时程曲线以及孔压比、剪应力与剪应变的关系曲线, 从图中可以得到以下结论:

(1) 整个试验过程中孔压比和剪应力的发展过程可以分成两个阶段: ① 在开始加载阶段, 孔压比相对比较稳定, 试样维持在高孔压状态, 有效应力较低, 抗剪能力较弱, 从而导致试样所承受的剪应力较低, 在此阶段剪应变按照预定速率发展, 而孔压比和剪应力变化不大; ② 随着加载的进行, 试样中的孔压比呈现出逐渐降低的趋势, 同样由于试样中有效应力的升高从而造成试样抵抗变形的能力逐渐增大, 表现在图 4 中, 可以发现要维持预定的应变速率对试样施加变形, 剪应力随着孔压比的降低而明显的增大。造成上述两阶段的原因主要是饱和砂土的强度受到土颗粒之间的摩擦阻力和土-水介质之间黏滞阻力的双重影响^[20], 在高孔压下, 土颗粒之间的摩阻力近乎为零导致饱和砂土有效应力接近为零, 此时饱和砂土的强度主要由土-水之间的黏滞力来承担; 随着孔压比的降低, 土颗粒之间的摩阻力逐渐增大, 进而导致土体有效应力变大, 饱和砂土的强度由土-水之间黏滞力和土颗粒之间摩阻力共同承担。

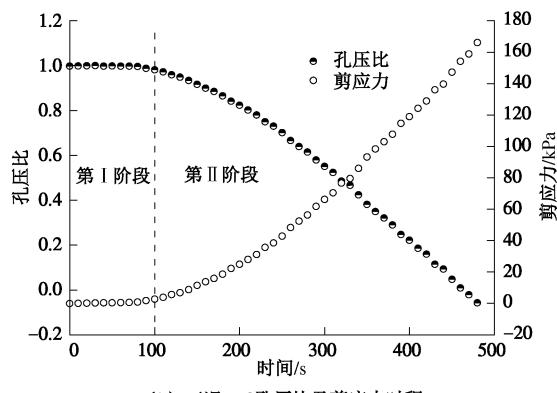
(2) 在整个两个试验阶段中, 剪应力的时程与孔压比的发展具有很好一致性关系, 根据有效应力原理可以知道, 试样中孔压比的发展可以影响其抗剪能力大小。

为了更直观地表示剪应力与孔压比的关系, 图 5, 6 分别给出了不同试验条件下剪应力-孔压比关系曲线, 从图中可以发现: ① 剪应力与孔压比的发展呈现

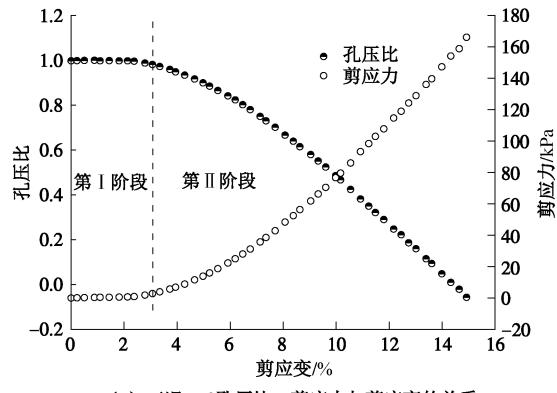
出良好的线性关系, 随着试验的进行, 孔压的消散, 试样中剪应力逐渐上升; ② 有效固结压力和加载速率对剪应力-孔压比关系曲线有显著的影响, 在同等的加载速率条件下, 孔压比水平相同, 有效固结压力越大, 剪应力越大, 这是因为有效固结压力越大, 当达到某一孔压比水平时, 试样中的有效应力越大, 从而导致相同的加载速率造成试样所受到的剪应力越大; 在同等的有效固结压力条件下, 孔压比水平相同, 加载速率越大, 剪应力则越大, 这表明液化后土体的力学特性有着明显的率相关性。



(a) 不同加载速率下孔压比及剪应力时程



(b) 工况SC3孔压比及剪应力时程



(c) 工况SC3孔压比、剪应力与剪应变的关系

图 4 有效围压 100 kPa 下部分工况的试验曲线

Fig. 4 Test curves under effective confining pressure of 100 kPa

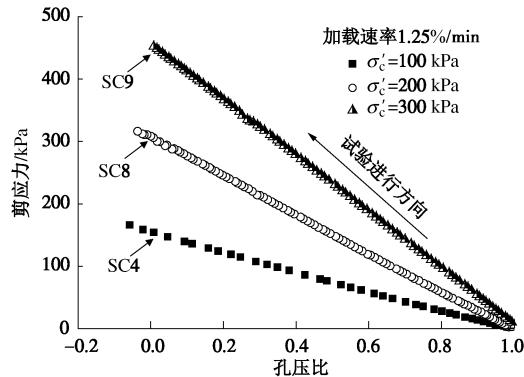


图 5 有效固结压力对剪应力 - 孔压比关系的影响

Fig. 5 Relationships between shear stress and pore water pressure ratio under different effective consolidation pressures

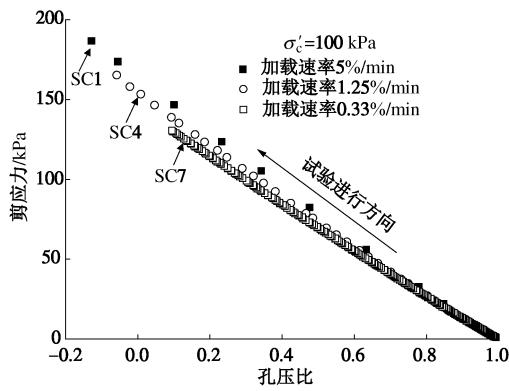


图 6 加载速率对剪应力 - 孔压比关系的影响

Fig. 6 Relationship between shear stress and pore water pressure ratio under different loading rates

3 液化后饱和砂土的流体本构模型

经过上述分析, 在饱和砂土液化后静力加载过程中土体所受的剪应力与土体中孔压比的发展呈现出很好的线性关系, 且两者的相关性受到有效固结压力及加载速率的影响, 因此提出以下式来描述液化后静加载过程中土体的力学特性:

$$\frac{\tau}{p_a} = -A \frac{u}{\sigma'_c} + B \quad , \quad (4)$$

式中, τ 为土体所受剪应力, $\frac{u}{\sigma'_c}$ 为孔压比, p_a 为标准大气压, $p_a=100$ kPa, A 和 B 为无量纲试验参数, 表 2 给出了不同试验条件下参数 A 和 B 的拟合值。从中可以看出 A 和 B 均受到有效固结压力及加载速率的影响, 且各工况 B 与 A 的比值均在 1.05 左右, 考虑到试验误差的因素以及基于简化模型的考虑, 式(4)可以进一步表示为

$$\frac{\tau}{p_a} = \left(1 - \frac{u}{\sigma'_c}\right) \cdot A + 0.05A \quad . \quad (5)$$

表 2 不同试验条件下参数拟合值

Table 2 Values of parameters under different test conditions

围压/kPa	加载速率 $/(10^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$			
		A	B	B/A
100	5.00	1.649	1.741	1.055
	2.85	1.612	1.726	1.071
	2.00	1.608	1.692	1.052
	1.25	1.547	1.615	1.044
	0.67	1.488	1.545	1.038
	0.50	1.453	1.518	1.045
200	0.33	1.406	1.483	1.055
	3.101	3.290	3.290	1.061
	1.25	4.491	4.707	1.048
	6.202	6.531	6.531	1.053
300				
400				

图 7 给出了试验参数 A 与有效固结压力及剪应变速率的关系, 其关系可以表示为

$$A = 0.025\sigma'_c \cdot \dot{\gamma}^{0.06} \quad , \quad (6)$$

进而式(5)可以表示为

$$\tau = \tau_1 + \tau_0 \quad , \quad (7)$$

$$\text{式中, } \tau_1 = \left(1 - \frac{u}{\sigma'_c}\right) \cdot 2.5 \cdot \sigma'_c \cdot \dot{\gamma}^{0.06} \quad , \quad (8)$$

$$\tau_0 = 0.05 \cdot 2.5 \cdot \sigma'_c \cdot \dot{\gamma}^{0.06} \quad . \quad (9)$$

或者式(7)可以表示为

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \left(1 - \frac{u}{\sigma'_c}\right) \cdot 2.5 \cdot \sigma'_c \cdot \dot{\gamma}^{-0.94} + 0.05 \cdot 2.5 \cdot \sigma'_c \cdot \dot{\gamma}^{-0.94} \quad , \quad (10)$$

式中, η 为表观黏度。

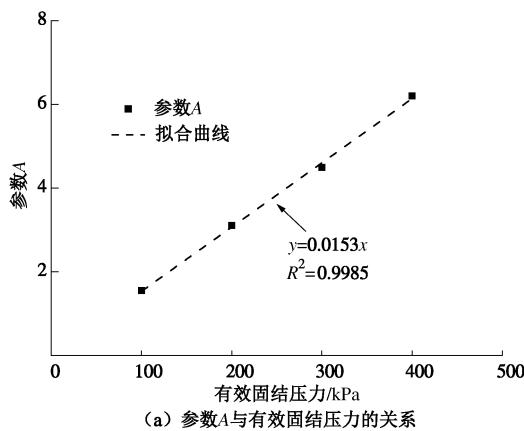
式(7)~(10)统一采用流体力学原理来分析构成饱和砂土强度的摩擦阻力和黏滞阻力两个组成部分, 从上述公式可以看出: ①当孔压比等于 1, 饱和砂土颗粒之间的摩阻力近乎为零, 饱和砂土具有较小的有效应力, 此时饱和砂土的强度主要为土-水介质的黏滞阻力; 随着孔压逐渐消散, 有效应力变大, 土颗粒之间的摩阻力逐渐增强, 饱和砂土的强度逐渐恢复, 这与前文剪应力与孔压比的发展时程所呈现出的两阶段特性相一致。②饱和砂土中摩阻力和黏滞阻力均表现出典型的剪切稀化非牛顿流体的应力特性^[21]。摩阻力 τ_1 表现出时变型幂律流体的应力特性, 黏滞阻力 τ_0 表现出非时变型幂律流体的应力特性。

根据流体力学相关知识, 式(7)可以进一步表示为

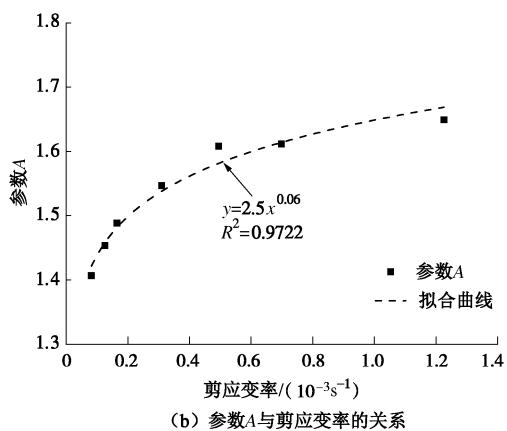
$$\tau = \lambda k \dot{\gamma}^n + c k \dot{\gamma}^n \quad , \quad (11)$$

式中, k 和 n 为幂律型流体的基本参数, 其中 $k = 2.5\sigma'_c$ 为稠度系数, 反映了流体的稠度, 它是流体直观流动性的表现, 初始有效围压越大, 流体的稠度越

大, 表明其流动性越弱; $n=0.06$ 为流性指数, 当 $n < 1$ 时, 为剪切稀化流体; 当 $n > 1$ 时, 为剪切稠化流体。当 $n=1$ 时, 为牛顿流体; n 与 1 的差值越大, 表明该拟塑性流体或膨胀性流体的流变性偏离牛顿流体越远, 本文中两种流体均属于剪切稀化流体。



(a) 参数A与有效固结压力的关系



(b) 参数A与剪应变率的关系

图 7 参数 A 的拟合结果

Fig. 7 Fitting curves of parameter A

$$\lambda = \left(1 - \frac{u}{\sigma_c'}\right)$$

为描述时变型流体内部结构状态的参数, 当孔压比为 1, $\lambda=0$ 时, 饱和土体内的结构完全破坏; 当孔压比为 0, $\lambda=1$ 时, 饱和土体内部结构完整。

$c=0.05$ 为通过试验确定的常量, 与流体本身性质有关。

4 模型的验证与比较

为了验证饱和砂土液化后流体本构模型的适用性, 进行了图 8 中两种工况下饱和南京细砂液化后的静加载验证性试验, 试验实测的结果与模型预测的剪应力与孔压比关系曲线见图 8。可以看出, 试验值与预测值基本吻合, 说明该模型具有较好的适用性。

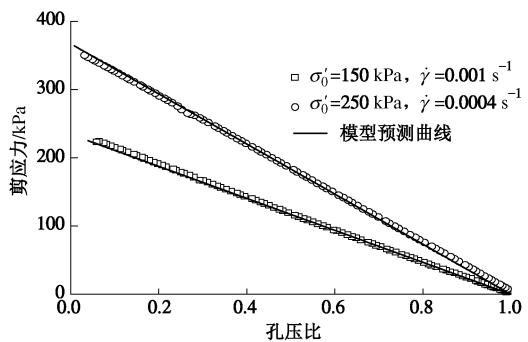


图 8 模型预测与实测结果对比

Fig. 8 Comparison between test results and predicted curves

同时, 图 9 给出了不同孔压比条件下, 表观黏度与剪应变率的预测曲线, 与其他学者的研究成果^[10-11, 17-18, 22]进行了对比分析, 利用有效固结压力对表观黏度进行了归一化以减小不同有效固结压力对试验结果的影响。从图中可以看出在不同孔压比条件下, 归一化黏度与剪应变率的关系在双对数坐标下呈线性关系, 且预测结果与其他学者的研究成果具有一致的规律性, 也进一步反映该模型具有较好的适用性。同时注意到本文与陈育民等^[18]的研究具有一定的出入, 其主要原因在于两者的研究手段具有较大差异, 本文利用改造后的空心圆柱扭剪仪对液化后砂土的力学特

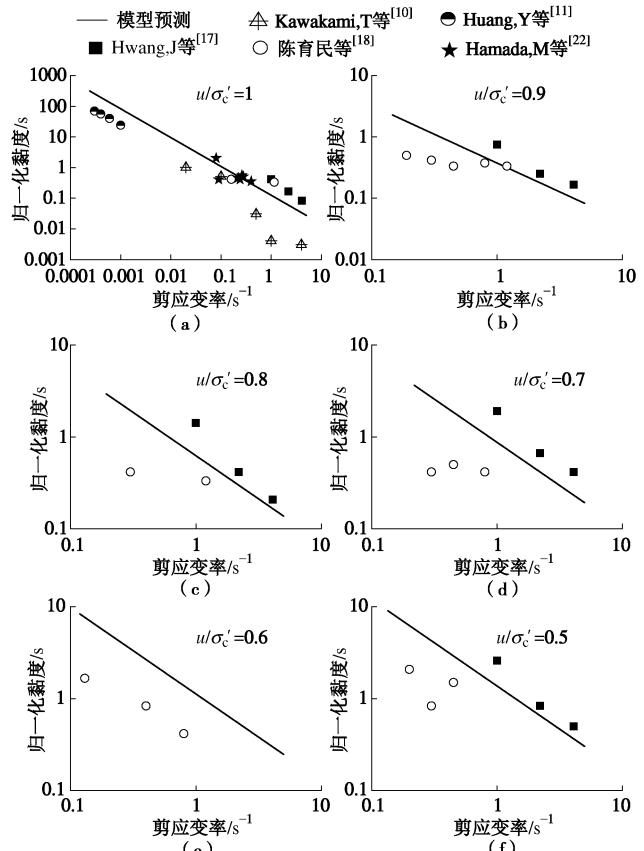


图 9 模型预测结果与其他学者研究成果对比

Fig. 9 Comparison between predicted curves and other researchers test results

性进行直接的测试和反映, 而陈育民利用钢球在饱和砂土中运动所受的阻力来反算砂土的力学特性, 并在计算过程中采取了一些数学简化。

5 结 论

开展了饱和南京细砂液化后常恒速率加载试验, 研究了饱和砂土的流体力学特性, 考虑了有效固结压力和加载速率对试验结果的影响, 得到以下3点结论:

(1) 在加载过程中, 剪应力与孔压比的发展时程表现出两阶段特性, 且剪应力与孔压比呈现出良好的线性关系, 随着孔压比的降低, 剪应力逐渐增大, 有效固结压力和加载速率对两者的关系具有明显的影响。

(2) 建立了饱和南京细砂液化后流体力学模型, 模型表明土颗粒之间的摩阻力表现出典型的时变型剪切稀化流体的性质, 孔压比的发展表征着饱和土体内部结构的变化, 土-水之间的黏滞力表现出非时变型剪切稀化流体的性质。

(3) 开展了饱和砂土液化后流体力学模型的验证性试验, 并与其他学者的研究成果相对比, 结果表明该模型具有较好的适用性。

参考文献:

- [1] 浜田政則, 安田進, 磯山龍二, 等. 液状化による地盤の永久変位の測定と考察[J]. 土木学会論文集, 1986, **376**: 211 - 220. (HAMADA M, YASUDA S, ISOYAMA R, et al. Observation of permanent ground displacements-induced by soil liquefaction[J]. Proceedings of Japan Society of Civil Engineering, 1986, **376**: 211 - 220. (in Japanese))
- [2] ADALIER K, A O. Liquefaction during the June 27, 1998 Adana-Ceyhan (Turkey) Earthquake[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2000, **18**(3): 155 - 174.
- [3] SONMEZ B, ULUSAY R. Liquefaction potential at Izmit Bay: comparison of predicted and observed soil liquefaction during the Kocaeli Earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2008, **67**(1): 1 - 9.
- [4] YUAN H, HUI Yang S, ANDRUS R D, et al. Liquefaction-induced ground failure: a study of the Chi-Chi earthquake cases[J]. Engineering Geology, 2004, **71**(1/2): 141 - 155.
- [5] TOWHATA I, GOTO S, TAGUCHI Y, et al. Liquefaction Consequences and Learned Lessons During the 2011 $M_w=9$ Gigantic Earthquake[J]. Indian Geotechnical Journal, 2013, **43**(2): 116 - 126.
- [6] TOWHATA I, YSSUDA S, KEN-ICHI T, et al. Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle[J]. Soils and Foundations, 1992, **3**(32): 97 - 116.
- [7] UZUOKA R, YASHIMA A, KAWAKAMI T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading[J]. Computers and Geotechnics, 1998, **22**(3): 243 - 282.
- [8] HADUSH S, YASHIMA A, UZUOKA R. Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2000, **27**(3): 199 - 224.
- [9] HADUSH S, YASHIMA A, UZUOKA R, et al. Liquefaction induced lateral spread analysis using the CIP method[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(8): 549 - 574.
- [10] KAWAKAMI T, SUEMASA N, HAMADA M, et al. Experimental study on mechanical properties of liquefied sand[C]// Proceedings of the 5th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction. Salt Lake City, 1994: 285 - 299.
- [11] HUANG Y, ZHENG H, MAO W, et al. Triaxial tests on the fluidic behavior of post-liquefaction sand[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **67**(8): 2325 - 2330.
- [12] SAWICKI A, MIERCZYŃSKI J. On the behaviour of liquefied soil[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(4): 531 - 536.
- [13] TOWHATA I, VARGAS-MONGE W, ORENSE R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1999, **18**(5): 347 - 361.
- [14] TAMATE S, TOWHATA I. Numerical simulation of ground flow caused by seismic liquefaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1999, **18**(7): 473 - 485.
- [15] DUNGCA J R, KUWANO J, TAKAHASHI A, et al. Shaking table tests on the lateral response of a pile buried in liquefied sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, **26**(2/3/4): 287 - 295.
- [16] 刘汉龙, 陈育民. 动扭剪试验中砂土液化后流动特性分析[J]. 岩土力学, 2009, **34**(6): 1537 - 1541. (LIU Han-long, CHEN Yu-min. Analysis of flow characteristics of dynamic torsional tests on post liquefied sand[J]. 2009, **34**(6): 1537 - 1541. (in Chinese))
- [17] HWANG J, KIM C, CHUNG C, et al. Viscous fluid characteristics of liquefied soils and behavior of piles

- subjected to flow of liquefied soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2006, **26**(2/3/4): 313 - 323.
- [18] 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]. 2009, **31**(9): 1408 - 1413. (in Chinese))
- [19] 王志华, 周恩全, 陈国兴. 孔压增长后的饱和砂土流体特性及其孔压相关性[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 528 - 533. (WANG Zhi-hua, ZHOU En-quan, CHEN Guo-xing, et al. Fluid characteristics dependent on excess pore water pressure of saturated sand after growth of pore pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 528 - 533. (in Chinese))
- [20] 谢定义, 张建民. 饱和砂土瞬态动力学特性与机理分析 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994. (XIE Ding-yi, ZHANG Jian-min. Transient dynamics characteristics and mechanism analysis of saturated sand[M]. Xian: Shanxi Publishing House of Science&Technology, 1994. (in Chinese))
- [21] 陈懋章. 黏性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. (CHEN Mao-zhang. Fundamentals of viscous fluid dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))
- [22] HAMADA M, SATO H, KAWAKAMI T, et al. A consideration of the mechanism for liquefaction-related large ground displacement[C]// Proceedings of the 5th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction. Salt Lake City, 1994: 217 - 232.

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 南京南瑞集团公司
封 4 上海分元土木工程科技有限公司
后插 1 北京理正软件股份有限公司
后插 2 西安力创材料检测技术有限公司