

# 基于流动性的饱和砂砾土液化机理

王志华<sup>1,2</sup>, 周恩全<sup>2</sup>, 吕丛<sup>2</sup>, 陈国兴<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 砂砾土的地震液化至今仍存较大的争议, 相应的液化机理解释主要沿用传统的砂土液化分析思路和方法。利用动态圆柱扭剪仪开展了 100 mm 直径、3 组典型级配 (含砾量分别为 37%, 45% 和 60%) 的饱和砂砾土试样循环动三轴实验。基于实验得到的应力-应变率关系曲线, 定义了反应饱和砂砾土流动性的平均流动系数和流动性水平。实验发现, 初始动应力比对不同含砾量下的平均流动系数-孔压比关系曲线无影响; 相对密度越大、含砾量越大, 饱和砂砾土的流动性水平越低; 有效固结压力对饱和砂砾土平均流动系数-孔压比关系曲线的影响与含砾量相关。推测饱和砂砾土在循环荷载下的流动性由其粗粒接触状态和数量决定; 粗粒间的接触在高孔压状态下不能顺利解除是饱和砂砾土与饱和细粒土抗液化性能的本质区别。提出的基于流动性的饱和砂砾土液化机理较好地解释了以上现象。

**关键词:** 饱和砂砾土; 液化; 含砾量; 平均流动系数; 流动性水平; 粗粒接触

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)10-1816-07

**作者简介:** 王志华(1977-), 男, 江西东乡人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土力学和地震工程研究与教学工作。E-mail: wzhnjut@163.com。

## Liquefaction mechanism of saturated gravelly soils based on flowing property

WANG Zhi-hua<sup>1,2</sup>, ZHOU En-quan<sup>2</sup>, LÜ Cong<sup>2</sup>, CHEN Guo-xing<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** There is still much controversy over earthquake liquefaction of gravelly soils, and the mechanism explanation about earthquake liquefaction of saturated gravelly soils is similar to that of sand liquefaction. The cyclic dynamic triaxial experiments on some saturated gravel samples with 3 groups of typical gradations (gravel contents of 37%, 45% and 65%) and the diameter of 100 mm are carried out by employing the dynamic hollow cylinder apparatus. Based on the relationship curves of the shear stress-strain rate from experimental results, an obvious phenomenon is discovered that the saturated gravelly soils possess the similar curve characteristics with the saturated sands. The curve shape is altered from the elliptical shape under low pore water pressure state to the dumbbell one under high pore water pressure state. According to this phenomenon, the average flow coefficient and fluidity level describing the flowing property of the saturated gravelly soils are defined. The influences of the initial dynamic stress ratio, effective consolidation pressure, relative dense and gravel content on the relationship curves between the average flow coefficient and the pore water pressure ratio are discovered and discussed. The experimental results show that the initial dynamic stress ratio has little effects on the relationship between the average flow coefficient and the pore water pressure ratio. The flow level of saturated gravelly soils decreases as the relative density or gravel content increases. The influences of effective consolidation pressure on the relationship curves between the average flow coefficient and the pore water pressure ratio are relative to the gravel content. It is conjectured that the fluidity of saturated gravelly soils under cyclic loading should be determined by the contact state and the scale between gravels in the soils. It might be the fundamental distinction between the anti-liquefaction performance of saturated gravelly soils and sands that the contact state between gravels can not be released favorably under high pore water pressure. A new mechanism of the liquefaction of the gravelly soils is proposed and used to interpret those phenomena mentioned above.

**Key words:** saturated gravelly soil; liquefaction; gravel content; average flow coefficient; fluidity level; gravel contact

## 0 引言

砂砾土由于孔隙大、排水性能好, 振动孔压不易

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172258, 51378257, 50908114);  
江苏省自然科学基金项目 (BK2011802)  
收稿日期: 2013-01-04

上升到液化的程度,通常认为砂砾土属于非液化土类,砂砾土可液化的观点并不为多数人所接受。然而,1964 年,美国阿拉斯加地震造成 Valdez 地区土体液化并引起地面滑移,液化场地大部分范围内均为含砾石砂土体<sup>[1]</sup>;1976 年唐山地震,北京密云水库白河主坝的砂砾料保护层发生液化、坝坡滑动<sup>[2]</sup>;Yegian 等<sup>[3]</sup>曾对美国 1988 年 Armenia 地震中的液化现象进行了详细调查和讨论,发现一些含砾量在 40%~50%的砂砾土发生了液化;1995 年阪神地震中,日本神户 Port Island 人工岛与六甲岛砂砾填土发生大范围的液化<sup>[4]</sup>;1999 年台湾集集地震造成南投和雾峰地区大范围松散砾石层液化<sup>[5]</sup>;袁晓铭等<sup>[5]</sup>对汶川地震震害进行的专门调查证实了砂砾土液化存在。这些发生于天然和人工场地地基、砂砾石坝坡上的实际液化现象促使研究者对砂砾土为非液化土的结论产生了怀疑<sup>[6-7]</sup>。

事实上,大量的室内试验也证实了砂砾土液化的可能性。Evans 等<sup>[8]</sup>进行了含砾量分别为 0%, 20%, 40%, 60%和 100%的一系列不排水动三轴试验。其主要结论为,砂砾土的抗液化强度随含砾量的增加显著增大;含砾量少的砂砾土液化现象与中密砂土的液化现象相似,而含砾量较高的砂砾土则表现为类似于密实砂土的“循环活动性”。Hatanaka 等<sup>[9]</sup>的试验结果表明虽然 Port 人工岛砂砾土含砾量较高,但其抗液化强度仍然较低。Tadashi 等<sup>[10]</sup>和 Xenaki 等<sup>[11]</sup>都强调相对密度与砂砾土抗液化强度有着良好的一致性。常亚屏等<sup>[12]</sup>和孔宪京等<sup>[13]</sup>的试验结果都表明不排水条件下不同含砾量的饱和砂砾土都可能发生液化。

目前,研究者在砂砾土液化分析中采用的液化标准多为细粒土液化分析常用的孔压或应变标准<sup>[13-14]</sup>,对砂砾土液化机理的探究也主要是分析级配、含砾量、相对密度等因素对砂砾土初始液化及抗液化强度影响。研究结论对明确砂砾土的液化可能性、抗液化性能等有积极的作用,但并未真正触及砂砾土的液化机理,也未明确饱和砂砾土液化和饱和砂土液化的本质区别。为此,本文利用大直径动态扭剪仪,对循环荷载下饱和砂砾土的液化机理进行了有益的讨论和分析。应用笔者<sup>[15]</sup>提出的平均流动系数定量表征土体的流动性,定义流动性水平以定量描述循环荷载下饱和砂砾土初始液化时的流动性,分析了饱和砂砾土的应力-应变率曲线特征;给出了初始动应力比、有效固结压力、相对密度、含砾量( $P_s$ 含量,指粒径大于等于 5 mm 部分土粒的质量与总质量比值)对平均流动系数-孔压比关系曲线和砂砾土流动性水平的影响规律;根据不同试验条件下饱和砂砾土的流动性特征,

提出了一种基于流动性的饱和砂砾土液化机理解释。

1 试验方案

1.1 试验土样

试验选用的砂砾料级配曲线以汶川地震现场钻孔取样得到的液化砂砾土的平均颗粒级配曲线为依据,试样采用等量替代法制备。试验土样的含砾量分别为 37%, 45%和 60%。该组级配曲线包含于中国海城、唐山、台湾集集和日本阪神等历史大地震的液化砂砾土级配曲线之中,具有一定的代表性,如图 1 所示。3 种级配砂砾土的颗粒组成和特征粒径值分列于表 1 和表 2。

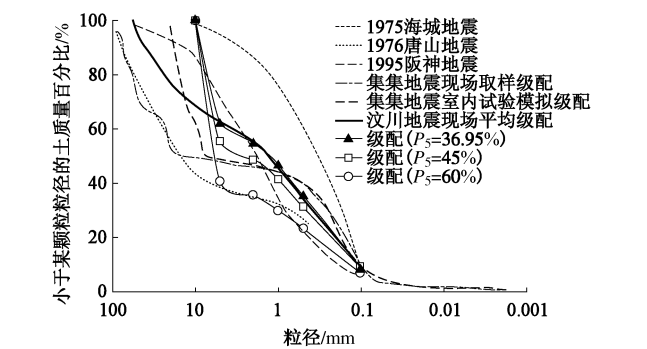


图 1 试验砂砾土样的颗粒级配

Fig. 1 Particle size of test gravelly soils

表 1 试验砂砾土料的级配

Table 1 Particle composition of test gravelly soils

级配 编号	颗粒组成/%						
	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	<0.1
I	37.00	7.76	8.00	11.90	14.6	10.9	10.00
II	45.00	6.76	6.97	10.36	12.82	9.39	8.71
III	60.00	4.91	5.07	7.54	9.28	6.87	6.33

表 2 试验级配的特征粒径值及土的分类

Table 2 Gradation features and classification of test soils

级配	$P_s$ /%	$d_{60}$ /mm	$d_{50}$ /mm	$d_{30}$ /mm	$d_{10}$ /mm	$C_u$	$C_c$	土样 分类
I	37.00	3.35	1.323	0.352	0.094	35.64	3.745	GP
II	45.00	5.40	5.240	0.467	0.109	49.54	4.284	GP
III	60.00	6.30	5.650	0.897	0.152	41.45	5.901	GP

1.2 试验设备和试样制备

试验设备为英国 GDS 空心圆柱扭剪仪(HCA 仪)。通过对其底座进行改装,用直径相同的不锈钢圆板底座置换空心试样底座中的铜芯透水石底座,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,实现空心圆柱试样的竖向循环加载三轴试验,试验设备见图 2。

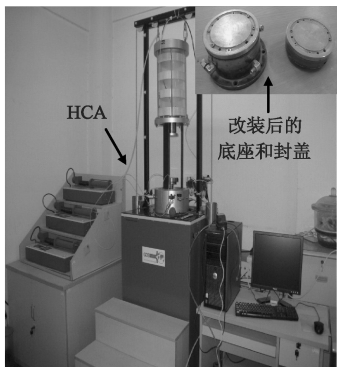


图2 试验所用 HCA 及辅助设备

Fig. 2 HCA and secondary facilities used in experiments

试样采用三瓣铜模制样器制备，圆柱体试样尺寸为直径 100 mm、高度 200 mm，分 5 层装样，逐层击实，控制试样干密度相对误差小于 5%。

首先向试样通适当压力的 CO<sub>2</sub> 约 30 min 后，放入真空桶抽气饱和，而后进行循环水饱和，直至连续 10 min 内排水阀不出现气泡；而后，将制备好的试样安装到 HCA 仪上，测孔隙水压力系数 *B* 值。若 *B* 值大于 0.95，则开始固结；若 *B* 值小于 0.95，则继续通循环水，直到 *B* 值满足要求。

1.3 试验方案

试验仅考虑均压固结情况。初始有效围压分别为 100 kPa 和 300 kPa；考虑相对密度分别为 30%，45% 和 70% 的 3 种密实度。试验方案见表 3。

表3 饱和砂砾土动三轴试验方案

Table 3 Scheme of dynamic triaxial experiments

试样级配	<i>P<sub>s</sub></i> /%	相对密度/%	有效围压/kPa
级配 I	37	30	100/300
		45	100/300
		70	100/300
级配 II	45	30	100/300
		45	100/300
		70	100/300
级配 III	60	30	100/300
		45	100/300
		70	100/300

试验采用应力控制加载，施加频率 1 Hz，施加的轴向循环荷载波形为正弦波。通过软件操作界面上显示的轴向应力、轴向应变、孔压时程曲线，监测试验进展。当试样的振动孔压比（振动孔压累积增长值/初始有效围压，即 *u*/*σ'<sub>c</sub>*）达到 0.98 及以上，且轴向应变几乎不再增加时，停止试验。

2 循环荷载下饱和砂砾土的流动性

2.1 循环荷载下饱和砂砾土应力 - 应变率曲线

循环荷载下饱和砂砾土的剪应变率可根据试验得到的轴向应变按以下两式计算：

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

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

式中，*ν* 为泊松比。文中所有工况均为不排水条件下的正弦振动，泊松比 *ν* 取 0.49；*ε* 为轴向应变；*γ<sub>i+1</sub>*，*γ<sub>i</sub>* 和 *γ<sub>i-1</sub>*，分别为由式（1）计算的 *t<sub>i+1</sub>*，*t<sub>i</sub>* 和 *t<sub>i-1</sub>* 时刻对应的剪应变；*γ̇<sub>i</sub>* 为 *t<sub>i</sub>* 时刻的剪应变率。

由轴向应力计算剪应力，则可以得到各工况下饱和砂砾土的剪应力 - 应变率关系曲线。图 3 为 *P<sub>s</sub>* 含量分别为 37%，45% 和 60% 的饱和砂砾土典型应力 - 应变率曲线。

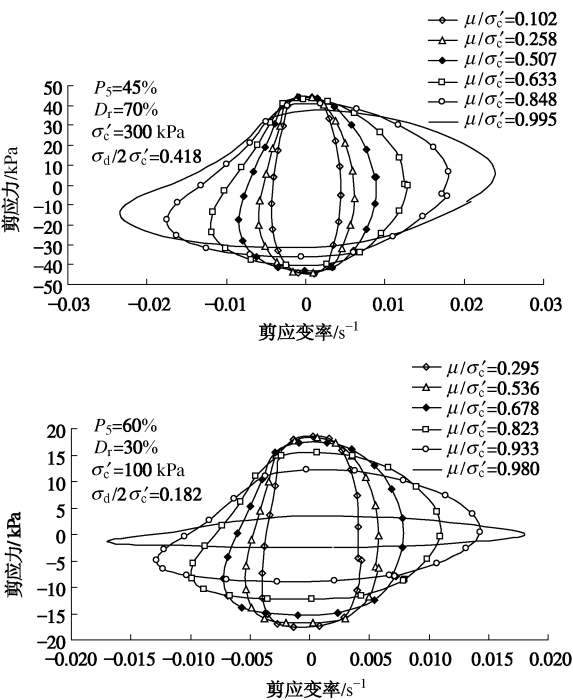


图3 不同 *P<sub>s</sub>* 含量的饱和砂砾土典型剪应力 - 应变率曲线

Fig. 3 Relationship curves of shear stress-strain rate

由图 3 可知，不同含砾量的饱和砂砾土剪应力 - 应变率关系曲线存在明显的异同点，主要特征如下：

（1）饱和砂砾土剪应力 - 应变率关系曲线具有与饱和砂土剪应力 - 应变率关系曲线类似的变化特征<sup>[15]</sup>，即由孔压较小时的“椭圆形”向孔压较高时的“哑铃形”转变。

（2）含砾量对曲线的形状有显著影响。含砾量越高，“哑铃形”曲线的中部内凹程度相对越弱。

根据流体力学的概念，流体应力 - 应变率曲线也即“流动曲线”，反映了流体的流动特性。这里，若从流体力学角度分析循环荷载下的饱和砂砾土的应力 - 应变率曲线，则曲线形状自“椭圆形”向“哑铃形”转变和过渡的过程说明饱和砂砾土的抗剪性降低、流

动性增强。

## 2.2 循环荷载下饱和砂砾土流动性的定量表征

考虑到饱和砂砾土和饱和砂土在循环荷载下具有类似的应力 - 应变率曲线发展过程, 故引入作者提出的平均流动系数以定量评价饱和砂砾土的流动性, 平均流动系数定义为<sup>[15]</sup>

$$\bar{\kappa} = \frac{(\tau_{\max} - \tau_{\min}) \cdot (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min})}{A} \cdot \frac{(\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min})}{(\tau_{\max} - \tau_{\min})} \quad (3)$$

式中  $\bar{\kappa}$  为平均流动系数 ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$ );  $A$  为任一周循环荷载作用下土体应力 - 应变率曲线所围成的面积 ( $\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\dot{\gamma}_{\max}$  为一周循环加载时的最大剪应变率 ( $\text{s}^{-1}$ );  $\dot{\gamma}_{\min}$  为一周循环加载时的最小剪应变率 ( $\text{s}^{-1}$ );  $\tau_{\max}$  和  $\tau_{\min}$  分别为一周循环中的波峰剪应力和波谷剪应力 ( $\text{kPa}$ )。

平均流动系数  $\bar{\kappa}$  不但反映了应力 - 应变率曲线的形状影响, 还体现了将饱和砂砾土作为流体考虑的表现粘度特性, 具有明确的物理意义<sup>[15]</sup>。

## 3 循环荷载下饱和砂砾土流动性特征

### 3.1 饱和砂砾土平均流动系数 - 孔压比关系曲线

根据循环荷载下饱和砂砾土的剪应力 - 应变率关系曲线, 由式 (3) 计算平均流动系数, 则可以得到平均流动系数的发展过程。对任一周循环加载, 平均流动系数与该周孔压比 (振动孔压比曲线的外包线值) 一一对应, 则可以作出循环加载过程中的平均流动系数 - 孔压比关系曲线。

定义: 流动性水平指循环荷载下砂砾土孔压比达到 1.0 时的平均流动系数。

图 4 为不同初始动应力比下的平均流动系数 - 孔压比关系曲线。试验结果展示的一个显著特征是, 相同的  $P_5$  含量、相对密度和有效围压下, 饱和砂砾土的平均流动系数 - 孔压比关系曲线几乎一致, 初始动应力比对平均流动系数 - 孔压比关系曲线无影响。由此推论, 对特定的场地, 土体在地震激励下的流动性仅由孔压比所决定。当明确场地可能遭遇地震动以及因此所激发的孔压水平, 则可容易确定土体所能达到的流动性。

图 5 给出了  $P_5$  含量和相对密度相同时, 有效固结压力对平均流动系数 - 孔压比关系曲线的影响。根据图 4 结论, 可排除初始动应力比不同造成的差异。从图中可以发现, 有效固结压力对平均流动系数 - 孔压比曲线的影响大致可分为两个阶段描述。第一阶段为曲线的近似直线段; 第二阶段为曲线的上升段, 具体体现在:

(1) 当  $P_5$  含量为 37% 时, 在孔压的整个发展过

程中, 有效固结压力越大, 相同孔压比对应的平均流动系数都越小, 也即流动性越弱。由此可见, 当  $P_5$  含量为 37% 时, 有效固结压力对土体在循环荷载下的流动性起到约束作用, 这与细粒土埋深越大越不易发生液化可作相同的理解。

(2) 当  $P_5$  含量分别为 45% 和 60% 时, 有效固结压力对平均流动系数的影响在两个阶段体现出明显差异: 第一阶段, 有效固结压力越大, 相同孔压比对应的流动系数越小, 这与  $P_5$  含量为 37% 时的现象一致; 第二阶段, 当孔压比接近于 1.0 时, 有效固结压力越大, 相同孔压比对应的平均流动系数稍大, 流动性水平也稍高。这一现象将结合后续的砂砾土液化机理解释作进一步说明。

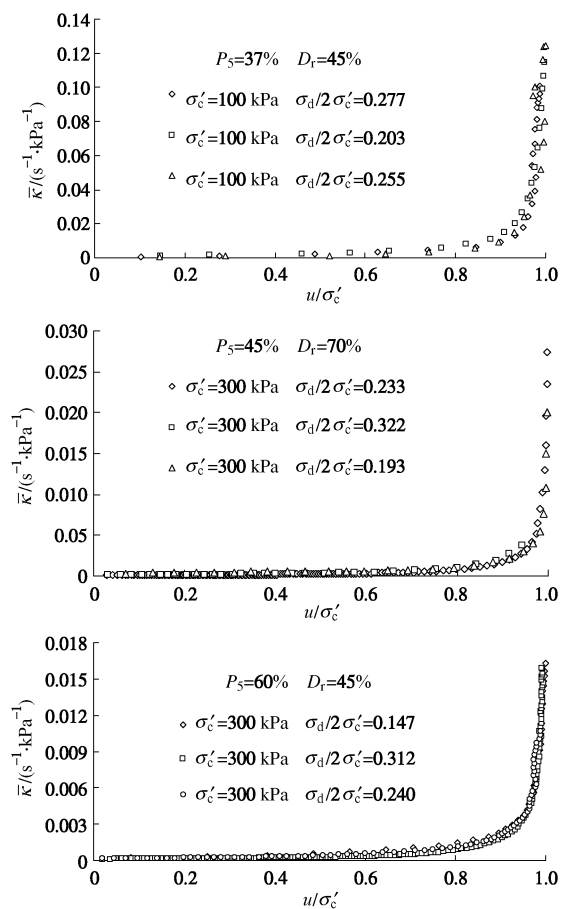


图 4 不同初始动应力比下的平均流动系数 - 孔压比关系曲线

Fig. 4 Relationship between  $\bar{\kappa}$  and pore water pressure ratio under different cyclic stress ratios

从以上的分析可知,  $P_5$  含量对砂砾土在循环荷载下的流动性发展起到重要的作用。这一点不仅反映在图 5 的流动性演变过程中, 且对于砂砾土可能达到的流动性水平也有着显著的影响。

### 3.2 饱和砂砾土的流动性水平

图 6 比较了不同  $P_5$  含量和相对密度条件下的砂砾土流动性水平。

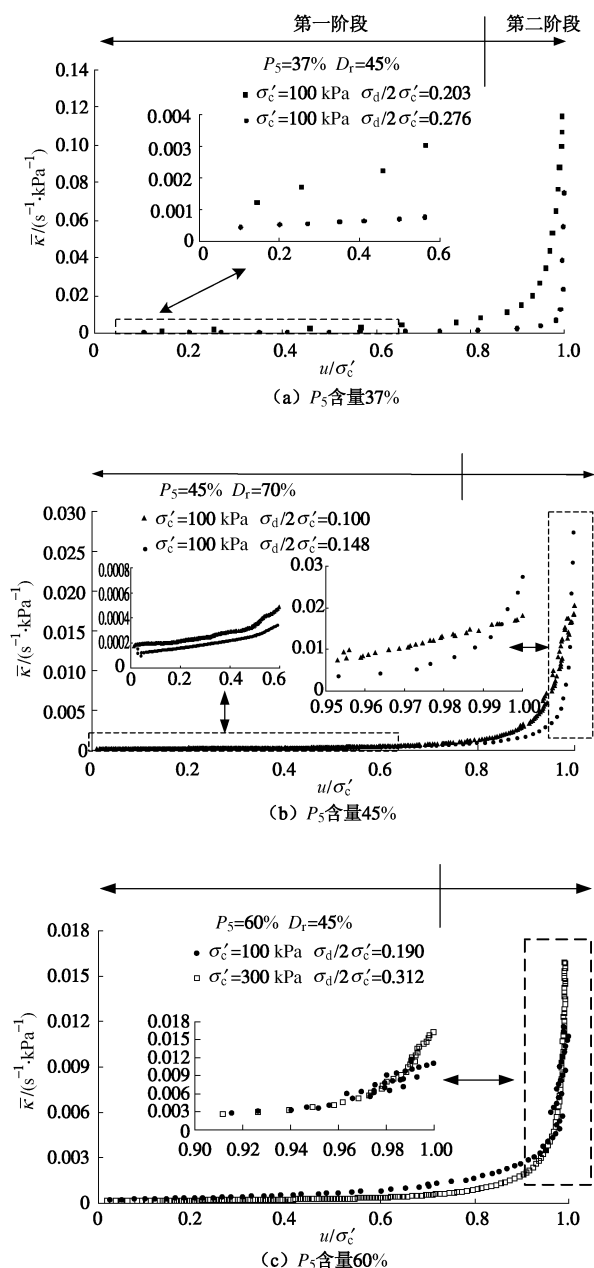
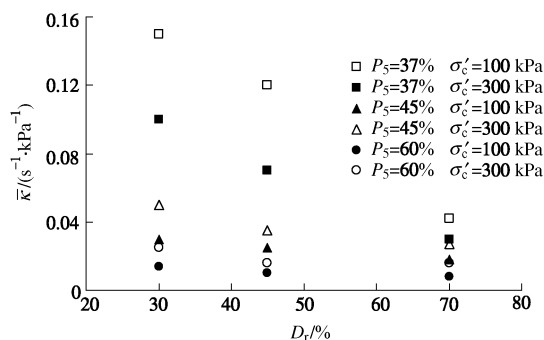


图5 有效固结压力对平均流动系数-孔压比关系曲线的影响

Fig. 5 Effects of effective confining pressure on relationship between  $\bar{K}$  and pore water pressure ratio图6 不同  $P_5$  含量和相对密度条件下的砂砾土流动性水平Fig. 6 Fluidity level of gravel soils under different  $P_5$  contents and relative densities

以有效固结压力  $\sigma'_c=100$  kPa、相对密度  $D_r=30\%$  的工况为例,  $P_5=37\%$  的砂砾土的流动性水平约为  $P_5=45\%$  的砂砾土的 5 倍、约为  $P_5=60\%$  的砂砾土的 10 倍。由此可见, 尽管试样测得的孔压比都能达到 1.0, 但是不同含砾量的砂砾土可能达到的流动性水平差异是显著的。

需要说明的是,  $P_5$  含量对砂砾土流动性水平的影响受限于初始相对密度和有效固结压力。相对密度越大、有效固结压力越大,  $P_5$  含量对砂砾土流动性水平的影响减弱。此外, 相对密度对砂砾土流动性水平的影响也是不可忽略的。所有的工况试验结果均表明, 相对密度越大, 其流动性水平越低。

## 4 对砂砾土液化机理的新解释和讨论

“液化”是指任何物质转化为液体的行为和过程<sup>[15]</sup>。室内试验中, “零有效应力”和“一定的双幅应变值”常作为液化标准来使用。由于饱和砂土等细粒土地震液化实例非常丰富、相关的室内试验成果颇多, 上述标准作为细粒土的液化标准使用积累了丰富的经验, 孔压和应变指标与循环荷载下的细粒土“液体”属性间存在较好的经验关系。作者认为上述标准作为饱和砂土等细粒土液化标准使用是合适的。

但是, 饱和砂砾土液化实例缺乏、室内试验成果有限。更为重要的是, 砂砾土的颗粒粒径间差异巨大。众多的试验都表明不同的含砾量对砂砾土的动力学行为和性能有着显著的影响, 这是与细粒土在物质组成上的本质区别。因此, 作者认为仍以孔压和应变等指标来判断砂砾土液化是不合适的。在当前相关研究成果有限的情况下, 仍需加深液化机理认识以改进饱和砂砾土液化分析方法。

### 4.1 流动性表征“液体”属性的合理性

循环荷载下饱和砂砾土发生液化, 则意味着饱和砂砾土成为“液体”或具有部分“液体”属性。从流体力学的角度看, 低抗剪性和流动性应是“液体”的基本属性。文中循环荷载下饱和砂砾土的应力-应变率关系曲线的一个重要特征是, 随着孔压累积, 相同的剪应力将产生更大的剪应变率, 这表明其抗剪能力降低; 曲线形状从“椭圆形”转为“哑铃形”说明其流动性增强。文中所定义的平均流动系数反映了强度特性和流动特性, 因此, 本文以平均流动系数为指标界定循环荷载下饱和砂砾土的流动性, 提出基于流动性的饱和砂砾土液化机理新解释。

### 4.2 饱和砂砾土液化机理新解释

根据饱和砂砾土在循环荷载下的流动性演变过程, 本文对饱和砂砾土液化机理作出以下推理和解释:

饱和砂砾土在不排水条件下, 循环荷载激励致使土体孔压升高, 细颗粒间的接触逐渐解除, 土体强度弱化, 平均流动系数缓慢增大, 流动性逐步增强。随着孔压比的增长, 越来越多的细粒、甚至较小粒径的粗颗粒也处于“悬浮”状态, 平均流动系数增长速率加大。对于饱和砂砾土, 由于含砾量和试验条件不同, 粗粒间的接触数量和状态将决定土体的平均流动系数发展程度。当土体平均流动系数急速增长且土体流动性水平达到一定程度, 则可认为饱和砂砾土发生液化。需要指出的是, 平均流动系数急速增长说明土体内部结构可能出现质的变化, 预示着固-液状态变换的可能。但这只是判断砂砾土液化的必要条件, 液化饱和砂砾土还需要满足“液体”的基本属性, 也即应达到一定的流动性水平, 这是判断饱和砂砾土液化的充分条件。诚然, 以上仅为饱和砂砾土液化机理的一种解释, 相关的液化标准和判别方法仍需要进一步的研究。

#### 4.3 基于流动性的饱和砂砾土液化机理的讨论

从以上观点出发, 本文对文中循环荷载下饱和砂砾土不排水循环三轴试验得到的一些现象和结论作出解释, 兼作讨论如下:

(1) 初始动应力比与平均流动系数-孔压比关系曲线不相关

依据以上解释, 对于任一特定的相对密度、有效固结压力和级配条件下的饱和砂砾土, 孔压、粒间接触状态和平均流动系数有着一一对应的关系, 初始动应力对土体的孔压发展有重要影响, 但与平均流动系数-孔压比关系曲线不相关。这一结论适用循环荷载下的饱和砂土<sup>[15]</sup>。

(2) 有效固结压力对不同  $P_5$  含量饱和砂砾土平均流动系数-孔压比关系曲线阶段性影响差异

由于粗粒间的接触比表面积相对细粒土大得多, 且粗粒形状不规则导致的粒间咬合力和摩擦力也较细粒土大, 粗粒直接接触解除所需力也应越大。因此, 粗粒间的接触是否因高孔压而丧失与粗粒间的接触状态有直接关系。

就图 5 试验结果而言, 当  $P_5$  含量相对较小时 ( $P_5 = 37\%$ ), 粗粒间的接触更多的是依赖细粒传递, 一旦细粒间的接触丧失, 则粗粒间的接触自然丧失(图 7 (a)), 故细粒间的接触状态对流动性水平起主导作用。正因为此, 有效固结压力对饱和砂砾土平均流动系数-孔压比关系曲线的影响体现了与细粒土的一致性。当  $P_5$  含量相对较大时 ( $P_5 = 45\%$  和  $P_5 = 60\%$ ), 粗粒间的直接接触存在, 且含砾量越大, 直接接触数量越大。这是高含砾量砂砾土流动性水平很低的主要原因。此时, 较小的有效固结压力下所激发的最大孔压可能并不足以解除这些粗粒间的接触(图 7 (b))。

相反地, 有效固结压力越大, 当孔压比接近于 1.0 时, 试样受剪过程中的粗粒间接触丧失的可能性更大, 原因可能是高压下粗粒间接触的不稳定性增强。当然, 这一推测需要借助于模拟循环荷载下饱和砂砾土细观颗粒接触演变过程的实验或其它手段予以验证。

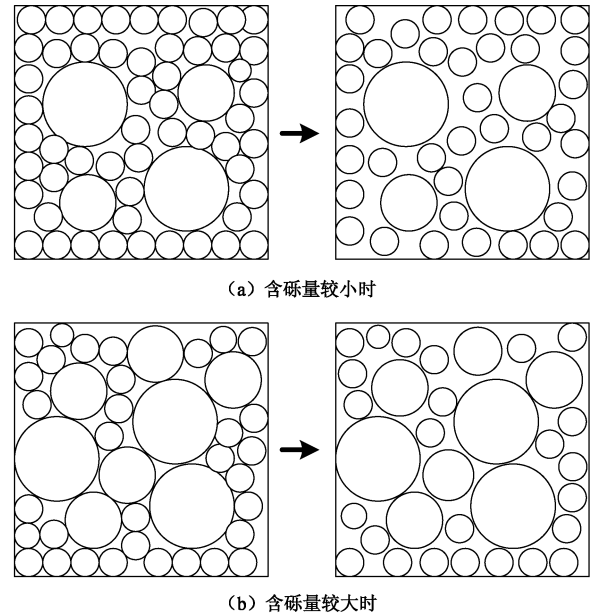


图 7 粗粒接触状态对流动性水平的影响示意

Fig. 7 Effects of contact state between gravels on fluidity level

(3) 不同  $P_5$  含量饱和砂砾土的流动性水平差异  
在其它试验条件相同的情况下, 不同  $P_5$  含量饱和砂砾土的流动性水平相差可达数倍甚至十倍之多。这同样印证了饱和砂砾土的粗粒接触对其流动性水平影响显著。而且有效固结压力越小, 相对密度越小, 影响越显著的现象也证明了上述解释的合理性。这应是饱和砂砾土抗液化性能中不可忽略的关键因素。

(4) 基于流动性的饱和砂砾土液化判别的合理性  
依据上述基于流动性的饱和砂砾土液化机理解释, 在特定地震动水平和场地条件下, 饱和砂砾土的流动性水平越高, 则土体越接近液化。结合图 6 及相关分析可知, 若以孔压比为 1.0 作为液化判别标准, 则  $P_5 = 37\%$  和  $P_5 = 60\%$  的饱和砂砾土在有效固结压力  $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ 、相对密度  $D_r = 30\%$  条件下均判为液化。但是, 两者的流动性水平却相差 10 倍之多。尽管目前仍没有建立以流动性为指标的液化判别准则, 无法进行定量判别。但可以推测的是, 流动性水平差异如此之大, 两种试样液化与否的最终判别结果很可能并不一致。从这一角度看, 基于流动性的饱和砂砾土液化判别显然较初始液化判别更为合理<sup>[16]</sup>。

## 5 结 论

本文利用室内动三轴试验, 研究了循环荷载下饱和砂砾土的流动性及主要特征, 分析了饱和砂砾土液

化机理,得到以下几点结论:

(1) 循环荷载下饱和砂砾土具有与饱和砂土类似的应力-应变率关系曲线变化特征,平均流动系数和流动性水平适合描述饱和砂砾土在循环荷载下的流动性。

(2) 特定条件下的饱和砂砾土平均流动系数-孔压比关系曲线不受初始动应力比的影响。相对密度越大,含砾量越大,则砂砾土的流动性水平越弱。

(3) 有效固结压力对饱和砂砾土平均流动系数-孔压比关系曲线的影响与含砾量相关。含砾量较低时,粗粒间的接触主要依赖细粒传递,有效固结压力对饱和砂砾土流动性的影响体现了与饱和细粒土的一致性;含砾量较高时,粗粒间的直接接触存在,有效固结压力对饱和砂砾土流动性水平的影响体现了与饱和细粒土的非一致性。

(4) 饱和砂砾土的粗粒接触状态和数量决定了其在循环荷载下的流动性。粗粒间的接触在高孔压状态下不能顺利解除是饱和砂砾土与饱和细粒土抗液化性能的本质区别。提出的基于流动性的饱和砂砾土液化机理较好地解释了实验现象。

#### 参考文献:

- [1] YOUD T L, HARP E L, KEEFER D K, et al. The Borah Peak, Idaho earthquake of October 8, 1983—Liquefaction[J]. *Earthquake Spectra*, 1985, 2(1): 71 - 89.
- [2] 刘惠珊, 乔太平, 王承春, 等. 场地的液化危害性[J]. *地震工程与工程振动*, 1984, 4(4): 69 - 78. (LIU Hui-shan, QIAO Tai-ping, WANG Cheng-chun, et al. Liquefaction risk evaluation during earthquakes[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1984, 4(4): 69 - 78. (in Chinese))
- [3] YEGIAN M K, GHAHRAMAN V G, HARUTIUNYAN R N. Liquefaction and embankment failure case histories, 1988 Armenia earthquake[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1994, 120(3): 581 - 596.
- [4] HATANAKA M, UCHIDA A, OH-OKA H. Correlation between the liquefaction strengths of saturated sands obtained by in-situ freezing method and rotary-type triple tube method[J]. *Soils and Foundations*. 1995, 35(2): 67 - 75.
- [5] 袁晓铭, 曹振中, 孙 锐, 等. 汶川8.0级地震液化特征初步研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(6): 1288 - 1296. (YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1288 - 1296. (in Chinese))
- [6] BEZERRA F H R, DA FONDECA V P, VITA-FINZI C, et al. Liquefaction-induced structures in Quaternary alluvial gravels and gravelly sediments, NE Brazil[J]. *Engineering Geology*, 2005, 76(3/4): 191 - 208.
- [7] KRINITZSKY E L, HYNES M E. The Bhuj, India, earthquake: lessons learned for earthquake safety of dams on alluvium[J]. *Engineering Geology*, 2002, 66(3/4): 163 - 196.
- [8] EVANS M D, ZHOU S P. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(3): 287 - 298.
- [9] HATANAKA M, UCHIDA A, OHARA J. liquefaction characteristics of a gravelly fill liquefied during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake[J]. *Soils and Foundations*, 1997, 37(3): 107 - 115.
- [10] TADASHI H, TAKAJI K, RYOUSUKE H. Undrained strength of gravelly soils with different particle gradations[C]// *Proceeding of 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B. C., Canada, 2004.
- [11] XENAKI V C, ATHANASOPOULOS G A. Dynamic and liquefaction resistance of two soil materials in an eathfill dam-laboratory test results[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(8): 605 - 620.
- [12] 王昆耀, 常亚屏, 陈 宁. 饱和砂砾料液化特性的试验研究[J]. *水利学报*, 2000(2): 37 - 41. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated sandy gravel[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(2): 37 - 41. (in Chinese))
- [13] 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 behaviour of static properties of saturated sand-gravel after liquefaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 103 - 106. (in Chinese))
- [14] ISHIHARA K. *Soil behavior in earthquake geotechnic*[M]. New York: Oxford University Press Inc, 1996.
- [15] 王志华, 周恩全, 陈国兴, 等. 循环荷载下饱和砂土固-液相变特征[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(9): 1604 - 1610. (WANG Zhi-hua, ZHOU En-quan, CHEN Guo-xing, et al. Characteristics of solid-liquid phase change of saturated sands under cyclic loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(9): 1604 - 1610. (in Chinese))
- [16] 陈国兴. *岩土地震工程学*[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. *Geotechnical earthquake engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))