

## 含砾量对饱和砂砾土液化特性的影响<sup>①</sup>

王艳丽<sup>1,2</sup>, 饶锡保<sup>2</sup>, 王占彬<sup>2</sup>, 何晓民<sup>2</sup>, 王 勇<sup>1</sup>

(1. 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 430070;  
2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**利用 GDS 循环三轴仪进行一系列饱和砂砾土不排水动三轴液化试验, 研究其在循环荷载作用下的液化特性, 分析含砾量对饱和砂砾土动强度和动孔压的影响规律。研究表明: 含砾量对砂砾土液化性能影响较大, 随着含砾量的增加砂砾土抗液化强度呈单调增加趋势; 随循环周次的增加孔隙水压力不断升高, 增长速率与所施加的循环应力幅值有关, 同一固结压力下, 振次比相同时循环动应力幅值越大动孔压比越大; 破坏振次对动孔压增长模式存在影响, 破坏振次较小时砂砾土动孔压增长模式呈双曲线型发展, 破坏振次较大时砂砾土的动孔压增长模式可用反正弦函数来表示, 且含砾量越大循环荷载引起的孔隙水压力越高; 含砾量对砂砾土液化特性的影响可从砂砾土的微细观结构特征得到阐释, 并借助其粒间状态参量进行分析。

**关键词:** 饱和砂砾土; 液化; 含砾量; 粒间状态参量

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0390-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0390

## Effect of Gravel Content on Liquefaction Characteristics of Saturated Sandy Gravels

WANG Yan-li<sup>1,2</sup>, RAO Xi-bao<sup>2</sup>, WANG Zhan-bin<sup>2</sup>, HE Xiao-min<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430070, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Using a GDS dynamic triaxial system, undrained dynamic triaxial tests on saturated sandy gravel were performed, the liquefaction characteristics of the saturated sandy gravel were analyzed, and the effects of gravel content on the dynamic liquefaction strength and dynamic pore pressure were analyzed. Results show that gravel content has a large influence on the liquefaction strength of saturated sandy gravel, monotonically increasing with increasing gravel content. The dynamic pore water pressure increases with the increase of cyclic times. When the consolidation ratio is the same, the dynamic pore water pressure ratio increases with increasing dynamic stress amplitudes under the same cycle ratio. The failure time of vibration affects the development pattern of pore water pressure significantly. The dynamic pore water pressure develops in the hyperbolic-type with lower failure time of vibration and can be expressed by the arcsine function for greater failure time of vibration. The dynamic pore water pressure increases with increasing gravel content. Effect of gravel content on the liquefaction characteristics of saturated sandy gravel can be explained from the microstructure features of the sandy gravel and can be analyzed through the

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309027, 51109208); 中国博士后科学基金项目(2013M531688); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(Z012009)

作者简介: 王艳丽(1981-), 女, 博士、高级工程师, 主要从事土动力学与土工抗震领域的研究. E-mail: wyldhh@126.com

inter-particle state parameters.

**Key words:** saturated sandy gravel; liquefaction; gravel content; inter-particle state parameter

### 0 引言

2008 年汶川 8.0 级特大地震是建国以来发生的破坏力最强、波及范围最广的一次地震,造成了惨痛的人员伤亡和巨大的经济损失。汶川大地震中土体液化及其震害显著,砂砾土液化是此次地震的突出特征之一<sup>[1]</sup>。汶川地震之前,各国学者针对地震诱发的液化破坏原因、产生机理、土体的动力响应以及液化和液化后强度与变形特性等问题开展了大量而广泛的研究,取得了丰硕的研究成果<sup>[2-8]</sup>,但多只关注于饱和砂土、粉土的液化问题。砂砾土因其颗粒较粗、渗透好、强度高、压缩性低特性,常被误认为是非液化土层,并作为天然地基或土工填筑材料,广泛应用于大坝修筑、填海造地、高速公路和高速铁路路基修筑等工程建设中,其在强震作用下的液化问题一直未引起足够的重视。事实上,在以往的地震液化现场考察中,也曾发现砂砾土液化,但对其研究成果相对较少。砂砾土一般是砾粒(粒径大于 2 mm)含量大于 50%的砂砾混合体<sup>[9]</sup>,由于砾石的存在使得其微细观结构与砂土有所差异,其颗粒形状、大小和位置随机分布的不均匀性使其具有多尺度散粒体的离散特征,因此它在循环荷载作用下的强度和变形特性都有别于砂土,同时砾石含量的多少直接影响其抗液化强度和动孔压发展规律。

近年来,国内外学者已开始关注饱和砂砾土液化特性的研究。Wong 等<sup>[10]</sup>、Banerjee 等<sup>[11]</sup>进行了饱和砂砾料固结不排水循环三轴试验,发现砂砾土与砂土一样存在“初始液化”现象,证明了砂砾土液化的可能性。汪闻韶等<sup>[12]</sup>、刘令瑶等<sup>[13]</sup>进行了不同含砾量砂砾土竖向振动台圆筒排水振动液化试验和饱和固结不排水循环三轴试验的对比,研究发现砂砾料的液化特性主要取决于其渗透系数和排水条件,并与其相对密度和砾粒含量及体积压缩性有关。Evans 等<sup>[14]</sup>研究了含砾量对砂砾土抗液化强度的影响,结果表明砂砾土的抗液化强度随含砾量的增加显著增大。付磊等<sup>[15]</sup>利用空心圆柱动扭剪仪研究了初始主应力偏转角对砂砾料动强度的影响。邹德高等<sup>[16]</sup>开展了饱和砂砾料的液化后静力再加载试验,研究了相对密度、初始有效固结压力和循环应力比等因素对砂砾料液化后静力再加载过程中变形与强度特性的影响。Hatanaka 等<sup>[17]</sup>、Suzuki 等<sup>[18]</sup>研究了试样扰动对砂砾土抗液化强度的影响。以上

这些研究多从宏观角度研究饱和砂砾土的抗液化强度,而对其动孔压的研究较少,单从含砾量对砂砾土抗液化强度的影响方面虽开展了相关研究,而且对其影响的微观机制还缺乏深入系统的研究。本文拟利用 GDS 循环三轴仪开展不同含砾量饱和砂砾土动三轴液化试验,分析含砾量对饱和砂砾土抗液化强度和动孔压的影响规律,并从砂砾土的微细观结构出发,对其影响规律进行阐释,以揭示含砾量对饱和砂砾土液化特性的影响机制。

### 1 试样与试验方案

#### 1.1 试样制备

试验所用材料取自青海省门源县石头峡枢纽大坝 II 号料场砂砾石料。制备试样前对所使用的砾粒和砂粒预先进行分选,土样晒干后过 20 mm、10 mm、5 mm、2 mm 和 1 mm 筛,选取粒径在 2~20 mm 范围内的颗粒为砾粒,粒径在 2 mm 以下的颗粒为砂粒和细粒。试验所用的重塑样由砾粒、砂粒与细粒分别按照不同比例重新配制而成,掺入的砾粒含量  $P_5$  (>5 mm 的颗粒含量)分别为 40%、50%、60%和 70%,相应的  $P_2$  (>2 mm 的颗粒含量)分别为 50%、60%、70%和 80%。其颗粒级配如图 1 所示,表 1 为不同级配试验土料的粒径特征值。

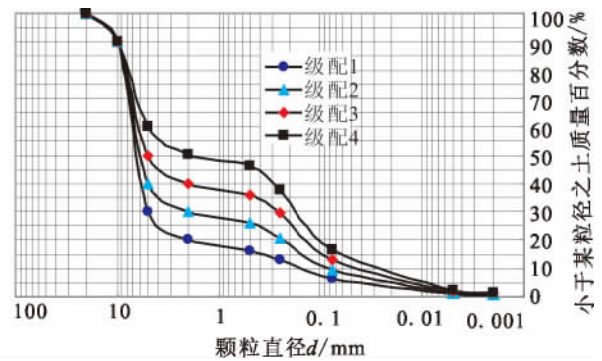


图 1 试验土料的颗粒级配曲线

Fig.1 Grading curve of test soil

试验采用直径为 101 mm,高度为 200 mm 的重塑土样。首先针对不同级配土样进行比重和相对密度试验。试验采用风干料,试样筒尺寸为  $\Phi 300 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ 。最小干密度试验采用量筒法,用铲靠着试样慢慢地均匀撒开;最大干密度试验采用表面振动法。试样表面静载为 14 kPa,振动频率为 50 Hz。振动历时 8 min。试样筒表面用环刀找平,然

表1 试验土料的粒径特征值

Table 1 Eigenvalue of particle size of test soil

级配编号	含砾量 $P_5/\%$	含砾量 $P_2/\%$	有效粒径 $d_{10}/\text{mm}$	平均粒径 $d_{50}/\text{mm}$	限制粒径			不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
					$d_{70}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$		
1	70	80	0.139	6.524	7.863	7.170	5.000	51.505	25.044
2	60	70	0.078	5.988	7.579	6.779	2.000	86.925	7.567
3	50	60	0.068	5.000	7.170	6.183	0.262	91.580	0.164
4	40	50	0.066	2.000	6.503	5.000	0.156	75.742	0.074

后根据颗粒总量、剩余量及试样体积计算试样的最大、最小干密度。图2为最大、最小干密度随含砾量的变化规律,由图可知,最大干密度随含砾量的增加呈先增大后减小的趋势,最小干密度随含砾量增加呈单调衰减趋势。试验按照同一相对密实度55%制样。

### 1.2 试验仪器

饱和砂砾土动三轴液化试验采用GDS循环三轴仪。图3为GDS单向循环三轴仪的整体构成。该仪器包括:制动单元、三轴压力室和平衡器、围压控制器、反压控制器、信号控制器、高速数据采集和控制卡(HSDAC卡)。

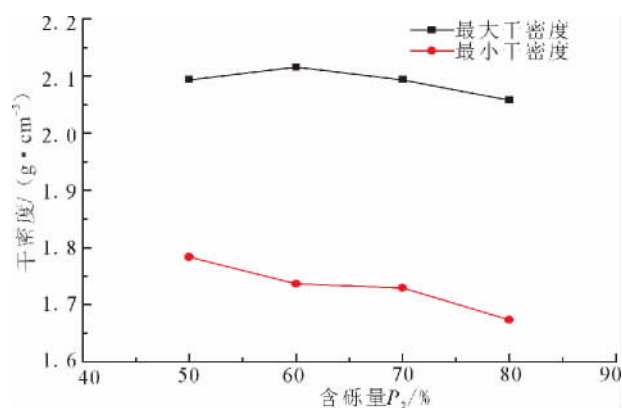


图2 干密度与含砾量的关系

Fig. 2 Relation between dry density and gravel content



图3 GDS循环三轴试验系统

Fig. 3 GDS cyclic triaxial test system

### 1.3 试验方法

试验采用水头及反压联合饱和法。当土样制备完成后,安装压力室,施加围压30 kPa,之后采用底部进水、顶部出水、自下而上的方式使试样饱和,通水饱和后对每个试样都进行饱和度鉴别。当孔隙压力系数 $B$ 大于或等于0.95时,可以认为试样已经达到饱和,如 $B$ 小于0.95,则应继续加反压饱和。文中所有试验 $B$ 值均大于0.95。试样饱和后施加预定的围压进行固结,各试样的有效固结围压为100 kPa,各向等压固结的稳定标准为体变值在5 min内不再增加。固结完成后即施加循环荷载,振动波形为正弦波,振动频率1 Hz。液化试验采用应力控制的方式,液化标准为孔压等于围压,或轴向应变等于5%。每个围压试样施加4~5个动应力进行试验,以求得动剪应力比与液化振次的关系。试验数据由计算机自动采集,试验记录下固结过程、振动孔压、动荷载、动应变的时程数据。本试验采用同一固结压力100 kPa,试验操作和数据整理参见《土工试验规程》(SL237-1999)。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 振动时程曲线分析

图4为循环荷载作用下典型饱和砂砾土液化的动三轴试验曲线,其中初始有效围压 $\sigma_{3c}$ 为100 kPa,循环剪应力比为 $\sigma_d/(2\sigma_c)=0.162$ 。由图可知:

(1) 动应力幅值随振动时间的持续有衰减的趋势,其衰减速率随循环次数的增加而逐渐增大。在振动初始阶段动应力幅值基本无变化;随着循环次数的增加动应力幅值有一定降低,到土体即将发生液化阶段动应力幅值大幅降低。(2) 由动应变的时程曲线可知,振动初期阶段动应变幅值很小,说明在此阶段土样处于弹性变形阶段。(3) 动孔压时程曲线表明动孔压呈波动上升的趋势,随循环次数的增加,土样结构发生变化,土颗粒之间因滑移而趋于紧密,孔隙水压力逐渐增高,使得土颗粒之间有效应力降低,试样由弹性变形发展为塑性变形,动应变幅值有了比较明显的增长。进入塑性阶段后,动应变急

速增大,此时土样所承受的荷载大部分由孔隙水来承担。当动应变或动孔压达到一定值时,土样发生破坏,承载力降低;此时,动应力曲线幅值明显缩小,动应变曲线幅值则呈喇叭口型急速增长的变化形态。

通过对试验中动应力时程曲线的整理发现,有的情况下动应力曲线衰减幅度较大(图 5)。这种现象一般发生在动应力幅值较大的试样中,施加动应力越大土体发生液化所需要的振次越小,动应力衰减幅值越大衰减的速率也就越高。对于含砾量  $P_2$  为 80% 的砂砾土,当动应变大幅增加至 5% 时,动孔压并未达到初始有效固结压力,而只达到有效围压的 90% 左右,这种情况下液化标准一般选用应变标准。

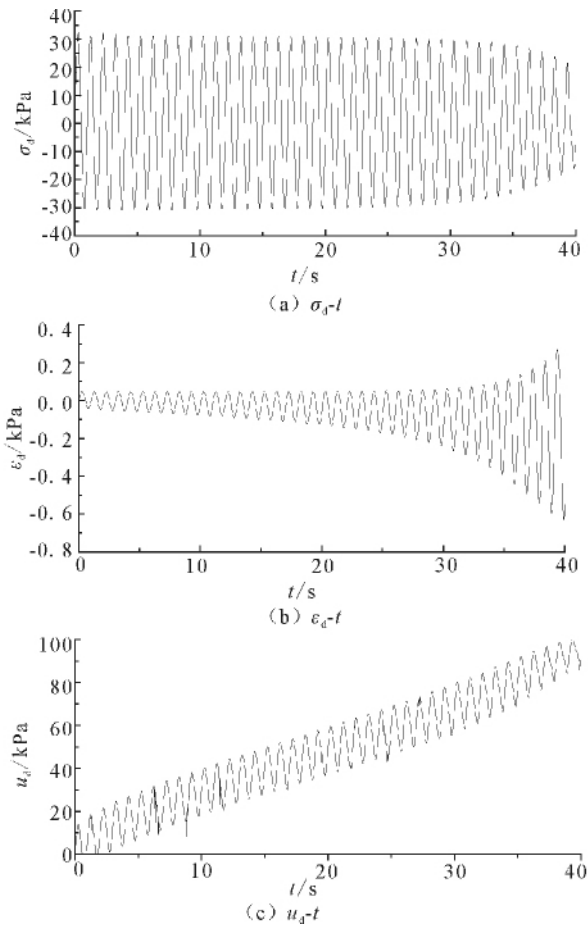


图 4 典型饱和砂砾土动三轴试验曲线( $P_2=60\%$ ,  $P_3=50\%$ )

Fig. 4 Curves of dynamic triaxial test on saturated sandy gravels ( $P_2=60\%$ ,  $P_3=50\%$ )

### 2.2 砂砾土的抗液化强度

图 6 给出了不同含砾量砂砾土动剪应力比  $\sigma_d/(2\sigma'_c)$  与破坏振次  $N_f$  之间的关系。由图可知,含砾

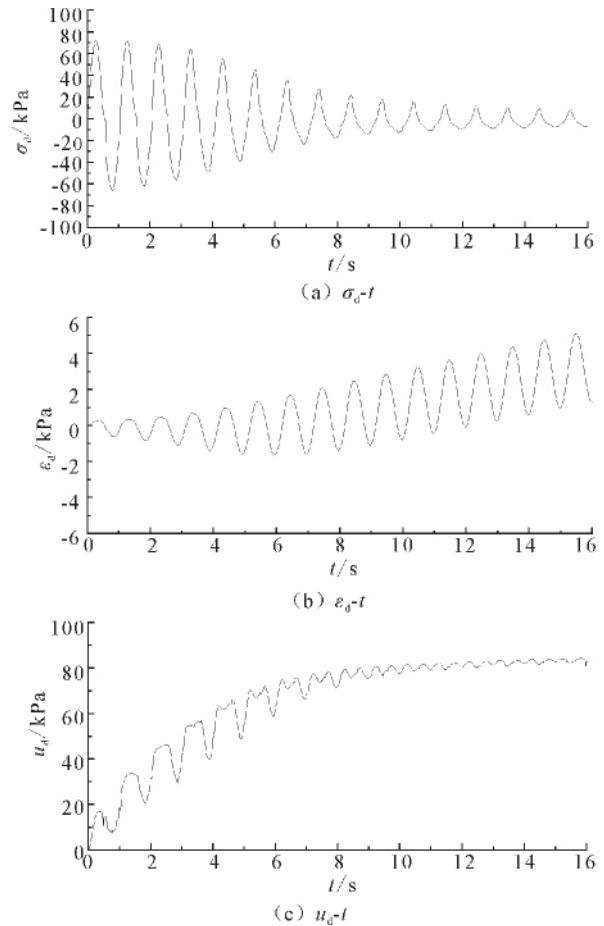


图 5 饱和砂砾土动三轴试验曲线(衰减明显)( $P_2=80\%$ ,  $P_3=70\%$ )

Fig. 5 Curves of dynamic triaxial test on saturated sandy gravels (obviously decay) ( $P_2=80\%$ ,  $P_3=70\%$ )

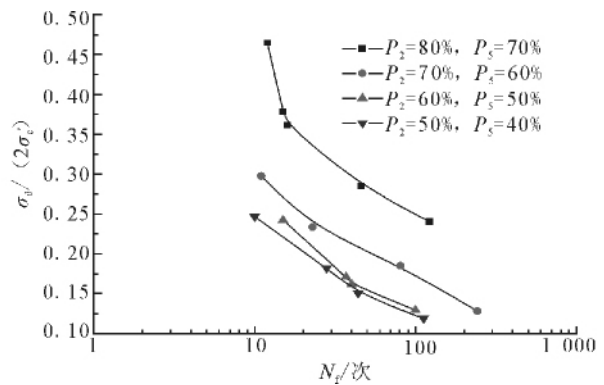


图 6 饱和砂砾土  $\sigma_d/(2\sigma'_c)$  与  $N_f$  之间的关系

Fig. 6 Relation between  $\sigma_d/(2\sigma'_c)$  of saturated sandy gravels and  $N_f$

量  $P_2$  为 50% 的试样相应的动剪应力比最小,当含砾量增加到 60% 时,其动剪应力比有小幅增大,之后,随着含砾量  $P_2$  的增加,其动剪应力比增幅较大,含砾量  $P_2$  为 80% 的试样其动剪应力比最大,即

抗液化性能最好。图7为特征振次分别为12、20、30时含砾量对动剪应力比的影响曲线。由图7可知,含砾量对砂砾土抗液化性能影响明显,随着含砾量的增加,砂砾土抗液化强度呈非线性递增趋势,说明与砂土相比,砂砾土具有较高的抗液化强度,同等条件下难于液化,这与粗粒土的工程特性是一致的。

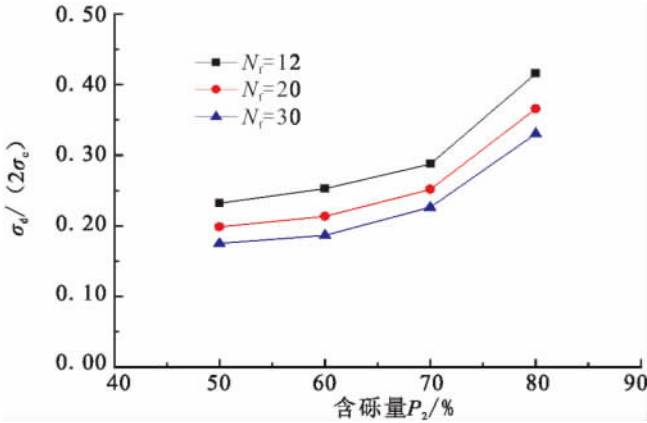


图7 含砾量对抗液化强度的影响

Fig. 7 Effect of gravel content on liquefaction resistance of saturated sandy gravels

### 2.3 砂砾土的动孔压特性

饱和砂砾土是由土颗粒与孔隙水组成的多孔两相介质。饱和砂砾土的液化是在一定条件下由于荷载作用导致的孔隙水压力增长的结果。孔压应力模型的特点是将孔压和施加的应力联系起来,施加的动应力可用破坏振次  $N_f$  来隐现,循环动应力幅值越大,破坏所需要的振次就越少。孔压的应力模型用孔压比  $u_d / \sigma'_c$  和振次比  $N / N_f$  之间的关系来表示。在固结比为1,有效围压  $\sigma_{3c}$  为100 kPa的条件下,不同动应力下典型饱和砂砾土试样动孔压比  $u_d / \sigma'_c$  与振次比  $N / N_f$  之间的典型关系见图8。由图可知,随着循环次数的增加,孔隙水压力将不断增加,孔隙水压力的增长速率同所施加的循环应力幅值有关。同一固结压力下,振动比  $N / N_f$  相同时,循环动应力幅值越大,动孔压比也越大。同时,破坏振次对动孔压增长模式也有影响。破坏振次  $N_f \leq 16$  时,饱和砂砾土动孔压增长模式呈双曲线型发展,这跟振动过程中动应力幅值衰减有关,动应力越大,破坏振次越小,其衰减的幅值就越大;破坏振次  $N_f \geq 121$  时,砂砾土的动孔压增长模式可用反正弦函数来表示:

$$\frac{u_d}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (1)$$

式中: $\theta$  为试验常数,取决于土类和试验条件。

图9为破坏振次较大时,不同含砾量砂砾土动孔压比  $u_d / \sigma'_c$  与振次比  $N / N_f$  之间的关系曲线。由图可知,其他条件相同的情况下,含砾量越大,循环荷载引起的孔隙水压力越大,含砾量与系数  $\theta$  的关系见表2。由表可知,随着含砾量的增加  $\theta$  逐渐增大。

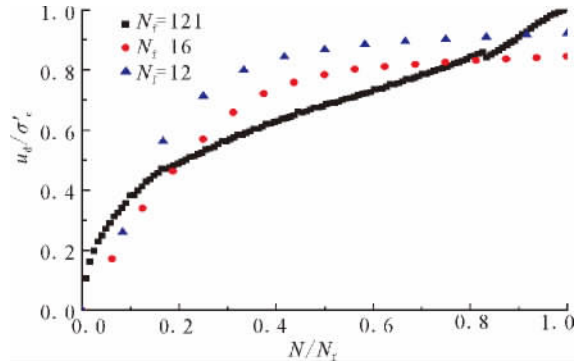


图8 典型饱和砂砾土试样  $u_d / \sigma'_c$  与  $N / N_f$  的关系

Fig. 8 Relation between  $u_d / \sigma'_c$  of typical saturated sandy gravel sample and  $N / N_f$

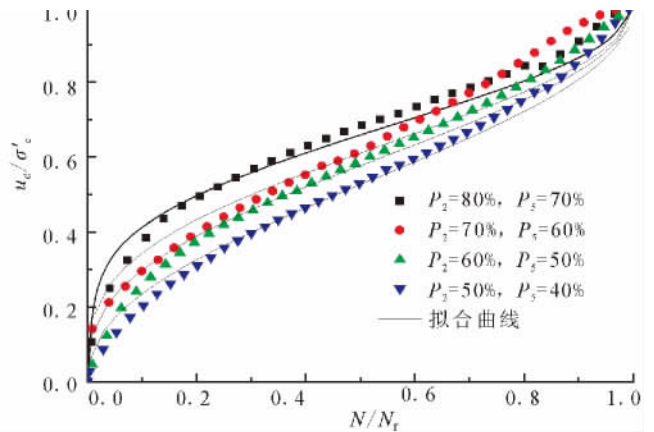


图9 含砾量对  $u_d / \sigma'_c$  与  $N / N_f$  关系的影响

Fig. 9 Effect of gravel content on relation between  $u_d / \sigma'_c$  of saturated sandy gravels and  $N / N_f$

表2 系数  $\theta$  与含砾量的关系

Table 2 Relation between parameter  $\theta$  and gravel content

系数	含砾量/%			
	50	60	70	80
$\theta$	1.125	1.444	1.726	2.281

## 3 含砾量对饱和砂砾土液化特性影响的机理研究

### 3.1 砂砾土的微观结构特征

由以上分析可知,针对本次试验所用的砂砾土,

含砾量对砂砾土液化特性的影响是单调变化的,即随着含砾量的增加砂砾土的抗液化强度逐渐升高,且在振次比相同的情况下,砂砾土的孔压比逐渐增大。含砾量对砂砾土液化特性的影响可从砂砾土的微观结构特征去解释。对砂砾土来说,以 2 mm 为界将砂砾土颗粒划分为砾粒组和砂粒组,可认为砂砾土的微观结构主要可分为两大类:(1)砂砾土的骨架由砂颗粒之间相互接触形成,其宏观力学性状由砂粒控制为主,砾粒为辅(图 10(a));(2)含砂砾土的骨架主要由粗颗粒(砾粒)之间相互接触形成,其宏观力学性状由砾粒控制为主,砂粒为辅(图 10(b)、(c)、(d))。在整体孔隙比不变的情况下,随着含砾量的增加,砂砾土的微观结构将从(a)过渡到(d),土体性状相应地将由砂粒组控制转换为砾粒组控制,在这一过程中存在含砾量的转折点  $P_{th}$ ,即临界含砾量。

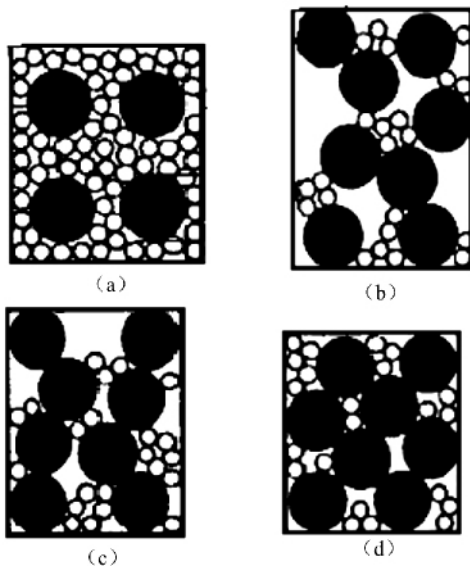


图 10 土体二元微观结构示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of binary microstructure of the soil<sup>[19]</sup>

### 3.2 砾粒间孔隙比

图 11 为饱和砂砾土的两相示意图。为分析方便,将其中各相分离。当含砾量  $P > P_{th}$ ,砂粒组对砂砾土力学性状的宏观表象并未起作用,或作用较小,则它的力链占土粒间相互作用比例不大。此时骨架孔隙比可按下式得到:

$$e_s = \frac{V_T G_s \rho_w}{M_t - M_s} - 1 \quad (2)$$

式中: $e_s$  为骨架孔隙比,为统一在砂砾土中使用,称为砾粒间孔隙比; $V_T$  为试样总体积; $\rho_w$  为水的密度; $M_t$

为试样中固体颗粒总质量; $M_s$  为试样中砂粒质量。

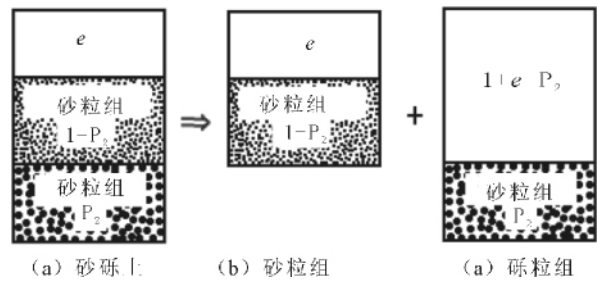


图 11 饱和砂砾土两相示意图

Fig. 11 Two-phase diagram of saturated sandy gravels

假定砂粒与砾粒具有相同的土粒比重(即使存在差别,但其比值很小,对物理指标的定义影响甚微)。如图 11,土体总孔隙体积为  $e$ ,含砾量为  $P_2$ (质量百分比数),则砾粒体积为  $P_2$ ,砂粒体积为  $1-P_2$ 。故可将式(2)简化为:

$$e_g = \frac{e + 1 - P_2}{P_2} \quad (3)$$

### 3.3 砂粒间孔隙比

当含砾量  $P < P_{th}$ 时,土体内部力链的形成和相互作用力的传递逐渐为砂粒所控制,砾粒被砂粒包围于其中而成为悬浮颗粒,故其相互不接触或接触很少,对土体性状的影响很小。尽管砾粒间的作用力可忽略不计,但其体积却不可不计。这种情形下砂粒作为土体的主骨架,砂粒间孔隙比定义为:

$$e_s = \frac{e}{1 - P_2} \quad (4)$$

当砂粒和砾粒中混合形成砂砾土时,由于砾粒含量较大,砂粒含量较小,砾粒相互排列形成骨架孔隙,砂粒并未占据砾粒间的孔隙,而是较多地游离在骨架孔隙内,砂砾土的动力特性主要由砾粒决定,其微观结构属于前述两种结构中的第二类。随着含砾量的逐渐增加,砾粒之间形成的骨架孔隙比  $e_g$  逐渐变小(图 12),使得土颗粒之间的接触点增多,土体内部力链作用力逐渐增大,相同应变水平下抵抗变形的能力也随之增大,从而使试样的动强度增大;同时随着骨架孔隙比  $e_g$  的减小,砂砾土的振动孔压发展较快,导致相同振次比作用下砂砾土动孔压增加。

## 4 结论

利用 GDS 循环三轴仪进行一系列饱和砂砾土不排水动三轴液化试验,研究含砾量对饱和砂砾土动强度和动孔压的影响规律,并基于粒间状态参量对其影响规律进行解释。主要得出以下结论:

(1) 含砾量对砂砾土液化性能影响较大,随着

含砾量的增加,砂砾土抗液化强度呈非线性增强趋势,说明与砂土相比,砂砾土具有较高的抗液化强度,同等条件下更难以液化,这与粗粒土的工程特性是一致的。

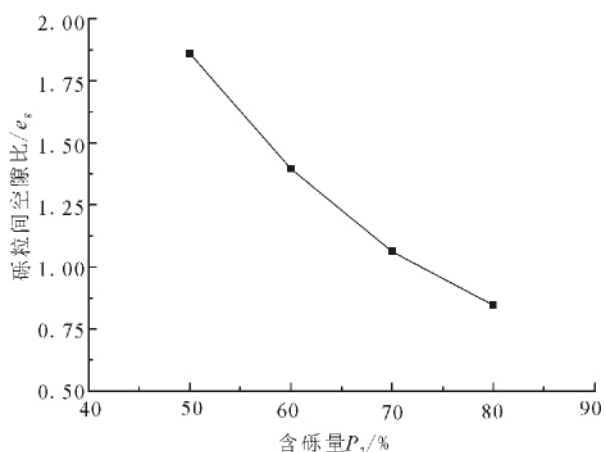


图 12 砾粒间空隙比  $e_g$  与含砾量的关系

Fig. 12 Relation between intergranular void ratio  $e_g$  and gravel content

(2) 随着循环次数的增加,孔隙水压力不断增加,其增长速率同所施加的循环应力幅值有关。同一固结压力下,振动比  $N/N_f$  相同时,循环动应力幅值越大,动孔压比也越大。

(3) 破坏振次对饱和砂砾土动孔压增长模式有影响,破坏振次较小时,饱和砂砾土动孔压增长模式呈双曲线型发展;破坏振次较大时,砂砾土的动孔压增长模式可用反正弦函数来表示,此时,含砾量越大,循环荷载引起的孔隙水压力越高。

(4) 当砂粒和砾粒混合形成砂砾土时,由于砾粒含量较大,砂粒含量较小,砂砾土的动力特性主要由砾粒决定。随着含砾量的逐渐增加,砾粒之间形成的骨架孔隙比逐渐变小,使得土颗粒之间的接触点增多,土体内部力链作用力逐渐增大,相同应变水平下抵抗变形的能力也随之增大,从而使试样的动强度增大;同时随着骨架孔隙比的减小,砂砾土的振动孔压发展较快,导致相同振次比作用下砂砾土动孔压增加。

#### 参考文献 (References)

- [1] 袁晓铭,曹振中. 汶川大地震液化的特点及带来的新问题[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 1-8.  
YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Features and New Aspects of Liquefaction in the Wenchuan Earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 1-50.

- ZHANG Jian-ming. New Advances in Basic Theories of Sand Dynamics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 1-50. (in Chinese)
- [3] Muhunthan B, Worthen D L. Critical State Framework for Liquefaction of Fine Grained Soils[J]. Engineering Geology, 2011, 117(1): 2-11.
- [4] Chen G X, Pan H. Effect of Initial Stress Conditions on the Threshold Shear Strain of Nanjing Saturated Fine Sand[J]. Earthquake Research in China, 2010, 24(1): 128-136.
- [5] Hazirbaba K, Rathje E M. Pore Pressure Generation of Silty Sands Due to Induced Cyclic Shear Strains[J]. J Geotechnical and Geoenvironmental Engrg, 2009, 135(12): 1892-1905.
- [6] Idriss I M, Boulanger R W. SPT- and CPT-based Relationships for the Residual Shear Strength of Liquefied Soils[C]//K D. Pitilakis ed. Earthquake Geotechnical Engineering, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures, Springer, The Netherlands, 2007: 1-22.
- [7] 王艳丽, 王勇. 饱和砂土液化后强度与变形特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 667-672.  
WANG Yan-li, WANG Yong. Experimental Study on Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sand After Liquefaction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 667-672. (in Chinese)
- [8] 周健, 杨永香, 贾敏才, 等. 细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1184-1188.  
ZHOU Jian, YANG Yong-xiang, JIA Min-cai, et al. Effect of Fines Content on Liquefaction Properties of Saturated Silty Sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1184-1188. (in Chinese)
- [9] 徐斌. 饱和砂砾料液化及液化后变形与强度特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
XU Bin. Experimental Study on Liquefaction and Behavior of Post-liquefaction Deformation and Strength in Saturated Sand-gravel Composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [10] Wong R T, Chan C K, Seed H B. Cyclic Loading Liquefaction of Gravelly Soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(6): 571-583.
- [11] Banerjee N G, Seed H B, Chan C K. Cyclic Behavior of Dense Coarse-grained Materials in Relation to Dams[R]. Report No. UCB/EERC-79/13, 1979.
- [12] 汪闻韶, 常亚屏, 左秀泓. 饱和砂砾料在振动和往返加荷下的液化特性[C]//水利水电科学研究院研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1986.  
WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping, ZUO Xiu-hong. Liquefaction Characteristics of Saturated Sandy Gravel Under Cycle Load[C]//Collected Research Papers of Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research. Beijing: Hydraulic Power Press, 1986. (in Chinese)

(下转 402 页)

Pressure[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1988. (in Chinese)

[2] Yoshimni Y. Tokimatsu Settlement of Building Saturated Sand During Earthquakes[J]. Soils and Foundation, 1977, 17(1): 23-28.

[3] Alyami M, Rouainia M, Wilkinson S M. Numerical Analysis of Deformation Behaviour of Quay Walls under Earthquake Loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29: 525-536.

[4] Biot M A. Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-saturated Porous Solid[J]. Acoust Soc Am, 1956, 28: 168-178.

[5] Pastor M, Zienkiewicz O C, Chan A H C. Generalized Plasticity and the Modelling of Soil Behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990, 14: 151-190.

[6] Cai F, Hagiwara T, Imamura S, et al. 2D Fully Coupled Liquefaction Analysis of Sand Ground Under Tank[C]//Proceedings of the 11th Japan Earthquake Engineering Symposium, 2002: 819-824. (in Japanese)

[7] 何开明, 周健, 王兰民. 强夯黄土地基抗液化性状的试验研究[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 27-30.

HE Kai-ming, ZHOU Jian, WANG Lan-min. Experimental Study on Anti-liquefaction of Rammed Loss Ground[J]. Underground Space, 2004, 24(1): 27-30. (in Chinese)



(上接 396 页)

[13] 刘令瑶, 李桂, 丙东屏. 密云水库白河主坝保护层地震破坏及砂砾料振动液化特性[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.

LIU Ling-yao, LI Gui, BING Dong-ping. Earthquake Damage of Miyun Reservoir's baihe Protective Layer and Liquefaction Characteristics of Saturated Sandy Gravel[M]. Beijing: Hydraulic Power Press, 1982. (in Chinese)

[14] Evans M D, Zhou S. Liquefaction Behavior of Sand-gravel Composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(3): 287-298.

[15] 邹德高, 徐斌, 孔宪京. 饱和砂砾料液化后应力应变关系及参数确定方法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 117-124.

ZOU De-gao, XU Bin, KONG Xian-jin. Study on the Stress-strain Relation of Liquefied Saturated Sand-gravel Composites and Method of Parameter Identification[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 117-124. (in Chinese)

[16] 付磊, 王洪瑾, 周景星. 主应力偏转角对砂砾料动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 435-440.

FU Lei, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing. Effect of the Initial Rotation Angle of Principal Stress on the Dynamic Properties of Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 435-440. (in Chinese)

[17] Hatanaka M, Uchida A, Ohara J. liquefaction Characteristics of a Gravelly Fill Liquefied During the 1995 Hyogo-Ken Nambu Earthquake[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(3): 107-115.

[18] Suzuki Y, Hatanaka M, Ishinara K, et al. Engineering Properties of Undisturbed Gravel Sample [C]//Proc. of 10th WCEE. 1992.

[19] Thevanayagam S. Effect of Fines and Confining Stress on Undrained Shear Strength of Silty Sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(6): 479-491.