

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0745

考虑排水条件和粗料含量的砂砾石土 动残余变形特性

赵 凯¹, 周建军², 孙 田¹, 刘德洋¹

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 中国中铁隧道集团有限公司 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘 要: 采用改进的 GDS 循环三轴试验系统对 5 种级配的饱和砂砾土在不排水、单面排水和双面排水条件下进行了动残余变形试验, 系统研究粗料含量 P_5 (粒径大于 5 mm 颗粒质量百分比) 和排水条件对饱和砂砾土动残余剪应变和动残余体应变的影响。试验结果表明: 动残余剪应变随粗料含量和排水面数的增加而显著降低; 循环加载 30 周产生的不排水动残余剪应变是单面排水条件下动残余剪应变的 2~3 倍, 是双面排水条件下的 4~9 倍。砂砾土的动残余体应变随粗料含量增大而减小, 随着排水面数的增加而增大; 双面排水动残余体应变是单面排水动残余体应变的 2.0~2.5 倍。

关 键 词: 排水条件; 粗料含量; 砂砾土; 动残余变形

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 03-0926-07

Dynamic residual deformation characteristics of saturated gravel soil considering drainage condition and coarse grain content

ZHAO Kai¹, ZHOU Jian-jun², SUN Tian¹, LIU De-yang¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China; 2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: A series of laboratory tests is performed to study the influence of drainage condition and coarse grain content on the dynamic residual deformation characteristics of the saturated gravel soil. Extensive tests are carried out under no-drainage, single-drainage and double-drainage conditions respectively, by using the improved GDS cyclic triaxial testing system. The gravel soil samples consist of five different gradations. The results indicate that, the dynamic residual shear strain is dominated by both the coarse grain content (the content of coarse particles, whose diameters are bigger than 5 mm) and the drainage condition. The residual shear strain significantly decreases as the coarse grain content and the number of drainage surfaces increase. When the number of the cyclic loading reaches 30, the dynamic residual shear strain under the no-drainage condition is 2-3 times that under the single-drainage condition, and 4-9 times that under the double-drainage condition. However, the dynamic residual volumetric strain of the saturated gravel soil decreases with the increase of the coarse grain content, as well as the number of drainage surfaces. The corresponding dynamic residual volumetric strain under the double-drainage condition is 2-2.5 times that under the single-drainage condition.

Keywords: drainage condition; coarse grain content; gravel soil; dynamic residual deformation

1 引 言

地震作用下土体残余变形的大小是土工构筑物地震变形和稳定性分析的重要指标。关于土的动残余变形特性, 国外学者的研究对象大多数是细粒土^[1]或砂土^[2-3], 而国内学者主要针对平均粒径 $d_{50} > 10$ mm 的土石坝 (堆石坝) 坝料开展研究, 考

虑的主要因素是固结压力^[4]、固结比^[5]、动剪应力水平^[6-8]及加筋^[9-10]等, 对砂砾土的动残余变形特性研究不多。砂砾土系指我国现行《土工试验规程》^[11]所定义的包括砾类土和砂类土在内的粗粒土。王昆耀等^[12]研究发现, 排水条件对砂砾石料的轴向变形影响显著, 其他条件相同时, 不排水条件下的轴向变形是排水条件下的 10~12 倍; 凌华^[4]、王昆耀^[12]

收稿日期: 2016-04-11

基金项目: 国家 863 计划课题 (No.2012AA041802, No.2012AA041803); 国家自然科学基金青年项目 (No.51608267)。

This work was supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (2012AA041802, 2012AA041803) and the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51608267).

第一作者简介: 赵凯, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 主要从事土力学及隧道工程的研究工作。E-mail: zhaokaiseu@aliyun.com

和阮元成^[13]等研究发现, 围压相同、施加的循环动应力比基本相同时, 砂砾土的动残余变形特性与堆石料动残余变形特性存在明显差异。砂砾土的颗粒组成极为分散, 一般可按粒径的大小把颗粒分为两部分, 以粒径 5 mm 作为分界粒径, 小于 5 mm 的颗粒称为细料, 大于 5 mm 的颗粒称为粗料, 粗料含量用 P_5 表示。兰道银^[14]、左永振^[15]、饶锡保^[16]等研究发现: P_5 对粗粒土的力学特性有显著影响, 因此, P_5 是影响砂砾土动残余变形特性的重要因素之一。在循环荷载作用下, 砂砾土会产生振动孔压, 导致有效应力降低, 强度下降, 若能及时排水, 消散振动孔压, 将有利于砂砾土抵抗残余变形。因此, 排水条件也是影响砂砾土动残余变形特性的重要因素之一。本文主要考虑排水面数和渗透系数两个因素, 设计了具有代表性的 5 种 P_5 的砂砾土, 开展动残余变形试验, 探讨了 P_5 、排水条件对砂砾土动残余变形特性的影响。

2 动残余变形试验

2.1 试验土料和试验仪器

试验用砂砾土的 5 种级配中, 两种级配的砂砾土 ($P_5=8.7\%$ 和 $P_5=14.0\%$) 取自糯扎渡大坝坝料, 在保证反滤料 P_5 不变的条件下缩尺得到; 另 3 种级配的砂砾土 (P_5 分别为 37.0%、45.0% 和 60.0%) 以

汶川地震液化砂砾土现场钻孔取样给出的颗粒级配曲线为依据, 采用等量替代法得到, 该组级配曲线穿插于中国海城地震、唐山地震、台湾集集地震和日本阪神地震等国内外历史地震液化砂砾土的级配曲线中, 具有代表性。砂砾土的颗粒级配见图 1, 其基本物理特性参数列于表 1, 其中 d_{60} 、 d_{50} 、 d_{30} 和 d_{10} 分别表示小于某粒径的土粒质量累计百分数为 60%、50%、30% 和 10% 时的粒径; C_u 和 C_c 分别为不均匀系数和曲率系数; e 为试样重塑完成时的孔隙比; e_{\max} 和 e_{\min} 分别为最大和最小孔隙比; ρ_d 为干密度; k 是在室内 20 °C 条件下采用 TST 渗透仪常水头法测得的渗透系数。

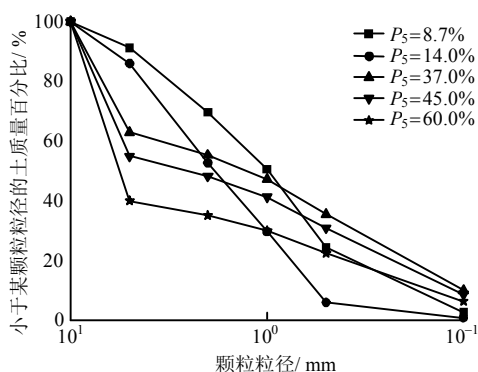


图 1 级配曲线

Fig.1 Grain size distribution curves

表 1 砂砾土基本物理特性参数
Table 1 Physical properties of materials

$P_5 / \%$	d_{60} / mm	d_{50} / mm	d_{30} / mm	d_{10} / mm	C_u	C_c	e_{\max}	e_{\min}	e	$\rho_d / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$k / (\text{cm}/\text{s})$
8.7	1.452	0.997	0.621	0.092	15.78	2.887	0.701	0.367	0.511	1.80	0.238
14.0	2.457	1.924	0.987	0.632	3.89	0.627	0.663	0.344	0.486	1.83	0.565
37.0	3.535	1.323	0.382	0.100	35.35	0.413	0.616	0.301	0.470	1.85	0.057
45.0	5.400	2.650	0.467	0.109	49.54	0.371	0.598	0.261	0.447	1.88	0.089
60.0	6.300	5.650	1.001	0.152	41.45	1.046	0.642	0.275	0.478	1.84	0.116

为满足砂砾土试验要求, 对 GDS 中型扭剪仪 (见图 2) 进行了局部改进, 其基本原理和功能见文献[17–18]。



图 2 试验仪器

Fig.2 Torsion shear apparatus

2.2 试验方法

动残余变形试验的初始有效围压 $\sigma'_{3c} = 200$ kPa 或 600 kPa; 固结比 $K_c = 2.0$ 。每组相同固结条件下的试样开展了双面排水、单面排水和不排水 3 种排水条件下的试验, 加载动应力比分两级 $\alpha_d = \sigma_d / (2\sigma'_{3c}) = 0.25$ 和 0.50, 其中 σ_d 是轴向循环动应力幅值, 表 2 列出了 $P_5=8.7\%$ 的砂砾土动残余变形试验方案, 其他 4 种 P_5 含量的砂砾土动残余变形试验的试验条件与该组试验条件相同。试验步骤如下:

(1) 制样 试样为实心圆柱体, 直径为 100 mm、高度为 200 mm。试验以《土工试验规程》^[11] 为参考进行, 采用控制干密度法重塑土样, 控制干密度见表 1。按照级配要求, 依次称取各粒径所需总质量的 1/5, 为了让粗料充分吸水饱和, 用水浸泡 4 h

后再开始装样。搅拌均匀每一份土样，倒入成样筒，振捣，用刻度尺量测试样高度，用小锤击实来保证每层土样高度为总高度的 1/5，装下一层土样前将已装好的土样表面打毛，重复上述步骤至试样重塑完成。

表 2 $P_5=8.7\%$ 砂砾土动残余变形试验方案
Table 2 Testing conditions for dynamic residual deformation tests conducted on gravel specimens with $P_5=8.7\%$

$P_5 / \%$	K_c	$\sigma'_{3c} / \text{kPa}$	$\alpha_d = \sigma_d / (2\sigma'_{3c})$	排水条件
8.7	2.0	200	0.25	不排水/单面排水/双面排水
8.7	2.0	200	0.50	不排水/单面排水/双面排水
8.7	2.0	600	0.25	不排水/单面排水/双面排水
8.7	2.0	600	0.50	不排水/单面排水/双面排水

(2) 饱和 制样完成后，从试样底部先通 CO_2 20 min，再通蒸馏水循环饱和，直到无气泡从试样顶端排水管冒出，然后进行孔压系数 B 检测：在不排水条件下，5 min 内缓慢增加围压 $\Delta\sigma_{3c}$ ，测试孔隙水压力变化值 Δu 。Xenaki 等^[19]认为砂砾土饱和时， B 值仍小于 1，本文试验中当 $B = \Delta u / \Delta\sigma_{3c} > 0.95$ 时，认为试样饱和。

(3) 固结 饱和完成后，施加围压固结，为了避免因孔压未消散就施加轴向压力使试样产生过大的轴向变形，在开始固结前，先施加一定的围压，然后分级施加围压和轴向压力直到既定目标值，开始排水固结。固结完成以 1 min 内的应变小于 10^{-5} 为标准。

(4) 加载 固结完成后，按试验方案要求，采用 0.1 Hz 的正弦波施加轴向循环荷载，每个试验往复循环加载 30 周，并记录轴向应力时程、轴向应变时程和试样体积变化时程等。

(5) 体积变化的测量 单面排水条件时，试样顶部排水阀关闭，底部排水阀开启，试样体积变化量即试样底部排水量；双面排水条件时，试样顶部和底部排水阀同时开启，试样体积变化量为试样顶部和底部排水量之和。

3 砂砾土的动残余变形特性

第 N 周循环荷载的结束点与固结完成时初始点所对应的轴向应变的差值定义为前 N 周循环荷载累积产生的动残余轴应变 $\varepsilon_{r,N}$ 。动残余剪应变 γ_r 和动残余轴应变 ε_r 之间的关系按 $\gamma_r = (1 + \mu)\varepsilon_r$ 换算，不排水、排水条件下的泊松比 μ 分别取 0.50 和 0.33^[20]。残余体应变 $\varepsilon_{vr} = V_d / V_0$ ，其中 V_d 为振动过

程中试样排水量， V_0 为试样固结完成后的体积。动残余剪应变和动残余体应变的角标依次表示排水条件和循环振次，其中不排水、单面排水和双面排水条件分别对应角标“u”、“s”和“d”，如“ $\gamma_{r,u30}$ ”表示不排水条件下循环振次 N 为 30 周的动残余剪应变，“ $\varepsilon_{vr,s20}$ ”表示单面排水条件下 N 为 20 周的动残余体应变。

3.1 动残余剪应变特性

按照 $\sigma'_{3c} = 200$ kPa 为例，将不同条件下的砂砾土的 γ_r 与 N 之间的关系曲线绘制于图 3~5，可知： γ_r 的增长速率随 N 的增加而减小，前 10 周循环荷载下 γ_r 积累较快，达到 $\gamma_{r,30}$ 的 50% 以上；相同条件下， γ_r 随 σ'_{3c} 和 α_d 的增大而增大；在不同的 σ'_{3c} 和 α_d 作用下， γ_r 随 N 增大的变化规律基本一致。

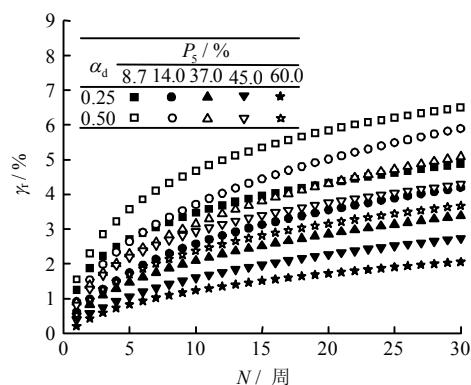


图 3 $\sigma'_{3c} = 200$ kPa，不排水条件下砂砾土动残余剪应变与循环振次的关系曲线

Fig.3 Relationships between residual shear strain and number of cycles under no-drainage condition, $\sigma'_{3c} = 200$ kPa

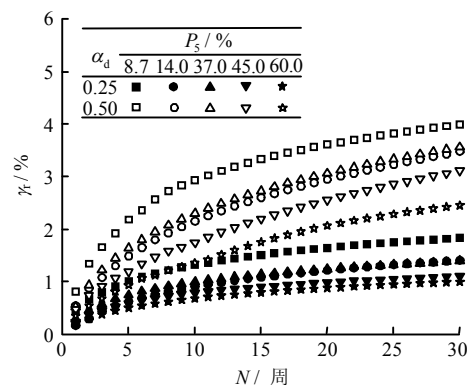


图 4 $\sigma'_{3c} = 200$ kPa，单面排水条件下砂砾土动残余剪应变与循环振次的关系曲线

Fig.4 Relationships between residual shear strain and number of cycles under single-drainage condition, $\sigma'_{3c} = 200$ kPa

以 $\sigma'_{3c} = 200$ kPa， $\alpha_d = 0.25$ 为例，将 $\gamma_{r,30} - C_u$ 、 $\gamma_{r,30} - d_{50}$ 和 $\gamma_{r,30} - P_5$ 关系曲线绘制于图 6、7 和 8。

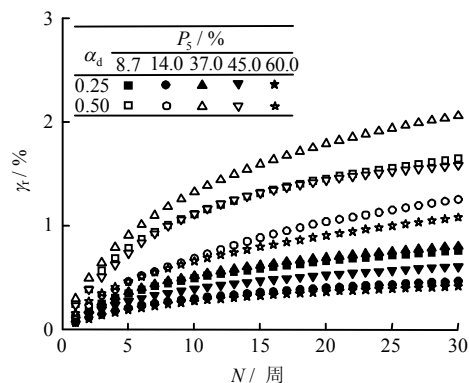


图5 $\sigma'_{3c} = 200$ kPa, 双面排水条件下砂砾土动残余剪应变与循环振次的关系曲线

Fig.5 Relationships between residual shear strain and number of cycles under double-drainage condition, $\sigma'_{3c} = 200$ kPa

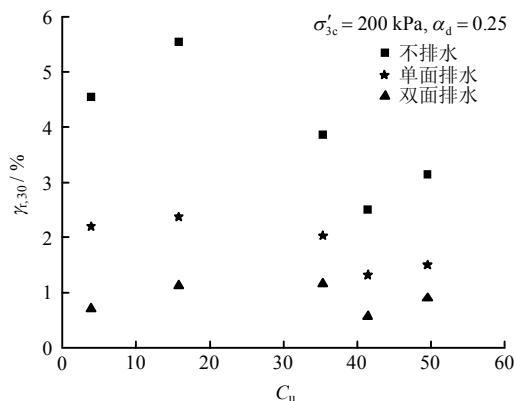


图6 C_u 对砂砾土 30 周动残余剪应变的影响

Fig.6 C_u effect on dynamic residual shear strain when the number of cycles is 30

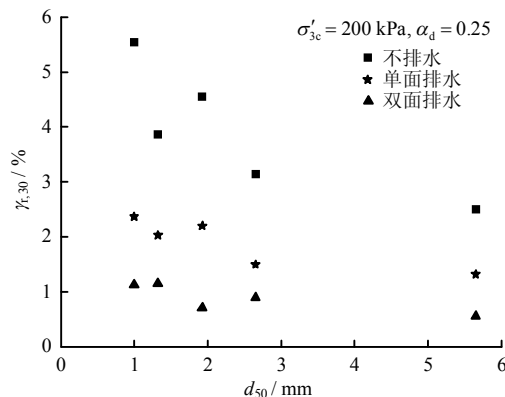


图7 d_{50} 对砂砾土 30 周动残余剪应变的影响

Fig.7 d_{50} effect on dynamic residual shear strain when the number of cycles is 30

由图3、图6~8可知,砂砾土的动残余剪应变特性受排水条件和颗粒级配(包括 P_5 、 C_u 和 d_{50})的影响,具体表现如下:

(1) 相同条件下,排水条件对 $\gamma_{r,30}$ 影响显著,但其对 γ_r 发展规律影响不大。 $\gamma_{r,u30}$ 是 $\gamma_{r,s30}$ 的2.06~

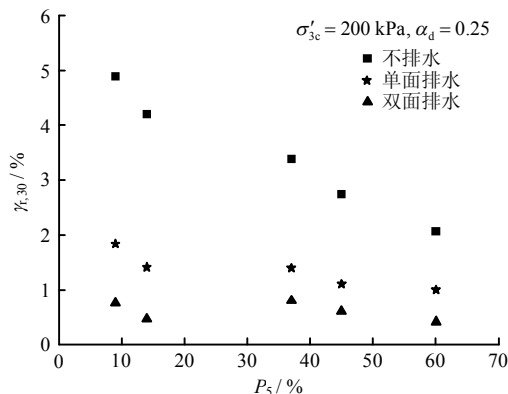


图8 P_5 对砂砾土 30 周动残余剪应变的影响

Fig.8 P_5 effect on dynamic residual shear strain when the number of cycles is 30

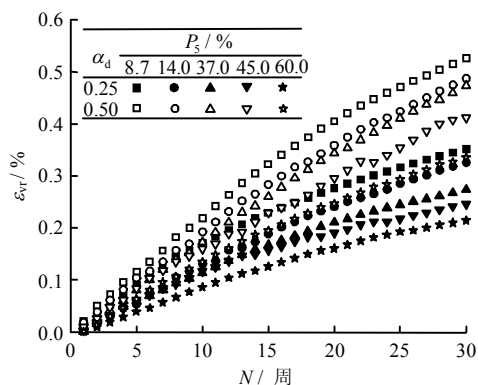
2.98 倍,是 $\gamma_{r,d30}$ 的4.22~9.05 倍,从不排水条件、单面排水条件到双面排水条件,不同 P_5 含量砂砾土的 $\gamma_{r,30}$ 差异越来越小,其中 $\gamma_{r,d30}$ 均在1%以下且相差较小; $N=10$ 周时,各排水条件下的 $\gamma_{r,10}$ 均达到对应 $\gamma_{r,30}$ 的58%以上,最高达到72.0%, N 从20周到30周, γ_r 的增大量不足 $\gamma_{r,30}$ 的20%,最小的增大量仅为 $\gamma_{r,30}$ 的10%。

(2) P_5 的增大提高了砂砾土抵抗动残余剪切变形的能力,但是在不同排水条件下, $\gamma_{r,30}$ 随着 P_5 的增大表现出不同的变化规律: $\gamma_{r,30}$ 在不排水条件、单面排水条件和双面排水条件下分别表现出单调减小、先减小后基本不变再减小和先减小后增大再减小的规律,并且 $P_5=14.0\%$ 与 $P_5=45.0\%$ 砂砾土的 $\gamma_{r,s30}$ 近似相等, $P_5=14.0\%$ 与 $P_5=60.0\%$ 砂砾土的 $\gamma_{r,d30}$ 相差很小。导致上述结果的原因是:砂砾土的 γ_r 与其强度密切相关,相同条件下,强度越高,抵抗剪切变形能力越强。在本文研究的 P_5 范围内,砂砾土强度随着 P_5 的增大而增大,故 $\gamma_{r,u30}$ 随 P_5 的增大而单调减小。在排水条件下, P_5 对砂砾土抵抗剪切变形的能力影响很大,排水界面和渗透系数 k 也起着重要的作用,排水界面越多, k 越大,振动过程中孔压累积越慢,有效围压降低越少,强度损失越少。例如,尽管 $P_5=14.0\%$ 的砂砾土粗粒含量不高,但其 k 分别是 $P_5=45.0\%$ 和 $P_5=60.0\%$ 砂砾土的6.35倍和4.87倍,振动过程中其孔压消散快,强度降低少,才出现了其 $\gamma_{r,s30}$ 与 $P_5=45\%$ 砂砾土的近似相等, $\gamma_{r,d30}$ 与 $P_5=60.0\%$ 砂砾土的相差很小的试验结果。但仅考虑糯扎渡坝料等效级配的砂砾土或3种设计级配的砂砾土,相同条件下,它们的渗透系数为同一量级,动残余剪应变变量随着 P_5 的增大而一致减小。因此,砂砾土动残余剪应变特性受 P_5 含量的影响很大,但不完全由它决定,土体的渗透系数也是一个不可忽略的因素。

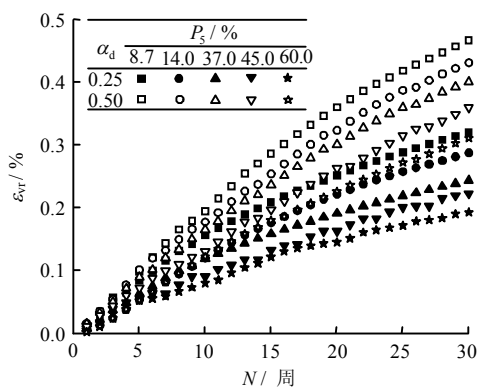
(3) 从本文砂砾土动残余变形试验结果分析可知, 当 C_u 较小 ($C_u \leq 15.8$) 时, 砂砾土表现出与砂土相近的强度特性, C_u 越大, 强度越小, $\gamma_{r,30}$ 越大, 但 C_u 较大 ($C_u \geq 35.3$) 时, 砂砾土的 $\gamma_{r,30}$ 与 C_u 的关系不明显; 仅在单面排水条件下, d_{50} 对砂砾土的 $\gamma_{r,s30}$ 的影响和 P_5 对 $\gamma_{r,s30}$ 的影响具有相似的规律, 不排水和双面排水条件下, $\gamma_{r,30}$ 与 d_{50} 之间没有明显的相关性。因此, C_u 和 d_{50} 对砂砾土动残余剪应变特性影响规律非单调, 尚需更多试验来研究颗粒级配和砂砾土动剪应变特性之间的关系。

3.2 动残余体应变特性

将 ε_{vr} 和 N 的关系图绘制于图 9、10, 可知: 不同 σ'_{3c} 和 α_d 作用下, 砂砾土的 ε_{vr} 随着 N 的增加而增加, 其增长速率随 N 的增加略有减小; 当 σ'_{3c} 、 N 相同, ε_{vr} 随着 α_d 的增大而增大; α_d 和 N 相同时, $\sigma'_{3c} = 200$ kPa 的 ε_{vr} 大于 $\sigma'_{3c} = 600$ kPa 的 ε_{vr} , 且 N 越大, 排水条件越好, 这一现象越明显。相同条件下 ε_{vr} 随 σ'_{3c} 增大而减小的这种规律与凌华^[4]、巩斯熠^[8]和曹培^[21]等对堆石料或砂砾料的 ε_{vr} 特性的研究结果存在差异。原因可能是: 导致 ε_{vr} 产生的主要



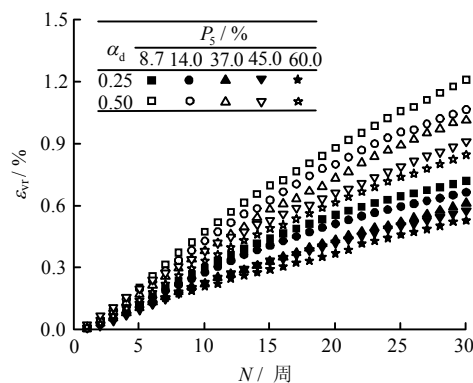
(a) $\sigma'_{3c} = 200$ kPa, 单面排水



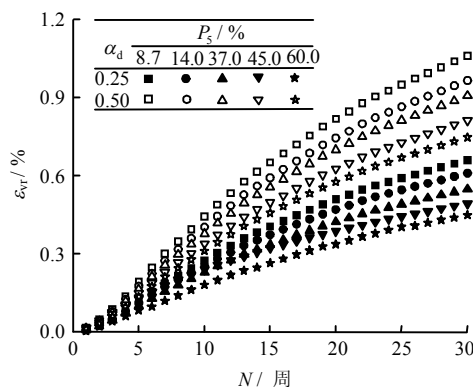
(b) $\sigma'_{3c} = 600$ kPa, 单面排水

图 9 单面排水条件下砂砾土动残余体应变与循环振次的关系曲线

Fig.9 Relationships between residual volume strain and number of cycles under single-drainage condition



(a) $\sigma'_{3c} = 200$ kPa, 双面排水



(b) $\sigma'_{3c} = 600$ kPa, 双面排水

图 10 双面排水条件下砂砾土动残余体应变与循环振次的关系曲线

Fig.10 Relationships between residual volume strain and number of cycles under double-drainage condition

原因有差异。 ε_{vr} 主要由循环荷载下土样振动变密实和颗粒破碎后结构重组两部分组成。振动密实量的大小决定于孔隙比 e 和最小孔隙比 e_{min} 之差和土体强度, 当 $\Delta e = e - e_{min}$ 一定, 土体强度越高, 可能的振动密实量越小; 土体强度一定, Δe 越大, 可能的振动密实量越大。一般情况下, 颗粒级配一样, σ'_{3c} 越大, 固结完成后 e 更接近 e_{min} , 即可能发生的振动密实量越小。颗粒破碎后结构重组一般发生在大颗粒含量高、 σ'_{3c} 和 σ_d 较大的角砾砂砾土土样^[22], 大颗粒破碎产生的小颗粒填充于大颗粒之间的空隙中导致了更大的 ε_{vr} 。本文研究的砂砾土以圆砾为主, 最大粒径为 10 mm、 σ'_{3c} 和 σ_d 较低, 只在 $\sigma'_{3c} = 600$ kPa, $\alpha_d = 0.50$ 时才发现颗粒破碎现象, 且破碎程度不高 (见图 11)。这说明, 循环荷载作用下, 砂砾土样中砾石颗粒破碎的现象客观存在, 但其 ε_{vr} 主要由振动密实产生, 而凌华等^[4]的研究对象中大颗粒粒径 (粒径大于 20 mm) 含量高、 σ'_{3c} 和 σ_d 大, 颗粒破碎、颗粒结构重组对试样的 ε_{vr} 贡献显著。

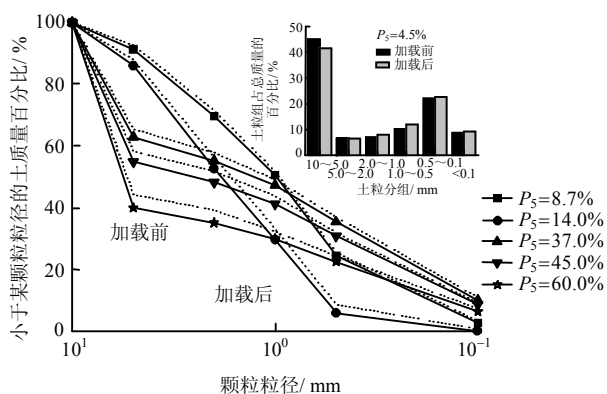


图 11 $\sigma'_{3c} = 600$ kPa, $\alpha_d = 0.50$ 条件下加载 30 周砂砾土颗粒级配曲线加载前后对比图 (右上角为 $P_5 = 45.0\%$ 砂砾土各土粒组加载前后质量百分比变化图)

Fig.11 Grain composition before and after loading ($\sigma'_{3c} = 600$ kPa, $\alpha_d = 0.50$); at the top right corner: change of weight percent for particle size fraction given $P_5 = 45.0\%$

相同条件下, ε_{vr} 随着 P_5 的增大而降低, 这主要原因是, 各 P_5 含量的砂砾土固结完成之后, e 和 e_{min} 之间差值相差不大, 但 P_5 越大, 强度越高, 改变土体结构使之振动密实越不容易, $\varepsilon_{vr, 30}$ 就越小。随 P_5 的增大, $\varepsilon_{vr, 30}$ 降低速率不大, 单面排水条件下较双面排水降低略快。 P_5 从 8.7% 增大到 37.0%、60.0%, 在单面排水条件下, $\varepsilon_{vr, s30}$ 分别降低了 24% 和 40%; 而在双面排水条件下, $\varepsilon_{vr, d30}$ 只分别降低了 17% 和 32%。

综上所述, 饱和砂砾土在排水条件下的抵抗剪切变形的能力比不排水条件下的大得多, 增加排水面可以有效降低动残余剪切变形量, 而在排水界面固定时, 采用渗透性更好的砂砾土能有效降低动残余剪切变形量。

4 结 论

(1) 其他条件相同时, 不排水条件下的 γ_r 远远大于单面排水和双面排水条件下的 γ_r 。不排水条件下, γ_r 随 P_5 增大而显著降低; 在排水条件下, P_5 不能完全决定砂砾土动残余剪应变特性, 土体的渗透系数对土体动剪应变也是一个不可忽略的因数。

(2) ε_{vr} 随 α_d 的增大而增大, 但随 σ'_{3c} 的增大而减小, 这一点与已有的堆石料动残余变形特性研究结果有差异, 原因可能是砂砾土动残余体应变主要来自于振动密实, 而堆石料在高围压、高动应力比下产生的动残余体应变更多来源于颗粒破碎、结构重组。

(3) 饱和砂砾土的 ε_{vr} 主要受排水条件影响, 在地震作用下的饱和砂砾土地, 排水好可能产生较

大的沉降; ε_{vr} 随 P_5 的增大而降低, 但其受 k 的影响不明显。

(4) 本文动残余变形试验结果表明, C_u 和 d_{50} 对砂砾土动残余剪应变特性影响规律非单调, 需要设计更多的试验来讨论颗粒级配对砂砾土动残余变形特性的影响。

参 考 文 献

- [1] SMALLEY I J, KUMAR R, HARA DHAND K, et al. The formation of silt material for terrestrial sediments: particularly loess and dust[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 179(1): 321—328.
- [2] TANIGUCHI E, WHITEMAN R V, MARR W A. Prediction of earthquake-induced deformation of earth dams[J]. *Soils and Foundations*, 1983, 23(4): 126—132.
- [3] GABRIELE CHIAROA, JUNICHI KOSEKIC, TAKESHI SATOD. Effects of initial static shear on liquefaction and large deformation properties of loose saturated Toyoura sand in undrained cyclic torsional shear tests[J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(3): 498—510.
- [4] 凌华, 傅华, 蔡正银, 等. 坝料动残余变形特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 532—537.
LING Hua, FU Hua, CAI Zheng-yin, et al. Experimental study on dynamic residual deformation characteristics of dam materials[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2010, 38(5): 532—537.
- [5] 王玉赞, 迟世春, 邵磊, 等. 堆石料残余变形特性与参数敏感性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 857—863.
WANG Yu-zan, CHI Shi-chun, SHAO Lei, et al. Residual deformation behavior of rockfill materials and sensitivity analysis of parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 857—863.
- [6] 贾革续, 孔宪京. 粗粒料动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 26—30.
JIA Ge-xu, KONG Xian-jing. Study on residual deformation characteristics of coarse-grained soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 26—30.
- [7] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 807—812.
ZOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 807—812.
- [8] 巩斯熠, 黄斌. 堆石料动力残余变形特性试验研究[J].

- 长江科学院院报, 2013, 30(1): 47—51.
- GONG Si-yi, HUANG Bin. Experimental study on the dynamic residual deformation property of rock-fill materials[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(1): 47—51.
- [9] 刘汉龙, 林永亮, 凌华, 等. 加筋堆石料的动残余变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1418—1421.
- LIU Han-long, LIN Yong-liang, LING Hua, et al. Residual deformation behaviors of reinforced rock-fill materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(9): 1418—1421.
- [10] 邹德高, 毕静, 徐斌, 等. 加筋砂砾料残余变形特性研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 158—162.
- ZOU De-gao, BI Jing, XU Bin, et al. Research on the residual deformation behavior of sand-gravel composites reinforced with geo-grid[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 158—162.
- [11] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [12] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 往返荷载下粗料土的残余变形特性[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 48—53.
- WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Residual deformation characteristics of coarse-grained soils under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(3): 48—53.
- [13] 阮元成, 陈宁, 常亚屏. 察汗乌苏水电站坝体料残余变形特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 74—77.
- RUAN Yuan-cheng, CHEN Ning, CHANG Ya-ping. Experimental study on the residual deformation properties of fill materials for the concrete-faced dam of Chahanwusu Hydropower Station[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2004, 35(10): 74—77.
- [14] 兰道银, 黄斌, 李红丽. 水布垭面板堆石坝坝料工程特性统计分析[J]. 人民长江, 2008, 39(6): 71—73.
- LAN Dao-yin, HUANG Bin, LI Hong-li. Statistical analysis on engineering characteristic of materials of Shuibuya faced rockfill dam[J]. **Yangtze River**, 2008, 39(6): 71—73.
- [15] 左永振, 张婷, 丁红顺. P_5 含量对滑坡体砾质土的力学性质影响试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊): 223—226.
- ZUO Yong-zhen, ZHANG Ting, DING Hong-shun. Study on the test of P_5 content affecting mechanical property of gravelly soil in landslide[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2011, 33(Supp.): 223—226.
- [16] 饶锡保, 何晓民, 刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(1): 21—25.
- RAO Xi-bao, HE Xiao-min, LIU Ming. Influence of coarse-grained content on engineering properties of gravelly soil[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1999, 16(1): 21—25.
- [17] 潘华, 陈国兴. 动态围压下心空圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1701—1707.
- PAN Hua, CHEN Guo-xing. Analysis of capabilities of HCA to simulate stress paths for principal stress rotation under dynamic confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1701—1707.
- [18] 孙田, 陈国兴, 周恩全, 等. 深层海床粉质黏土动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 1): 9—14.
- SUN Tian, CHEN Guo-xing, ZHOU En-quan, et al. Experimental research on the dynamic shear modulus and the damping ratio of deep-seabed marine silty clay[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(Supp.1): 9—14.
- [19] XENAKI V C, ATHANASOPOULOS G A. Dynamic properties and liquefaction resistance of two soil materials in an earthfill dam-Laboratory test results[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2008, 28(2): 605—620.
- [20] YASUDA N, OHTA N, NAKAMURA A. Dynamic deformation characteristics of undisturbed riverbed gravels[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(3): 237—249.
- [21] 曹培, 王芳, 严丽雪, 等. 砂砾料动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 211—215.
- CAO Pei, WANG Fang, YAN Li-xue, et al. Experimental study of residual deformation behavior of sandy gravel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 211—215.
- [22] 孙田, 陈国兴, 王炳辉, 等. 砾石颗粒形状对砂砾土动剪切模量和阻尼比影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 4211—4217.
- SUN Tian, CHEN Guo-xing, WANG Bing-hui, et al. Experimental research of effect of granule shape on shear modulus and damping ratio of gravel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.2): 4211—4217.