

DOI: 10.11779/CJGE202205012

颗粒特性对材料小应变动力特性的影响

黄志鹏¹, 魏 晓^{*1}, 潘 坤², 杨仲轩¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 土体的小应变剪切模量和阻尼比是表征土体动力学特性的重要参数。针对文献中关于砂土颗粒形状与粒径大小对小应变动力特性的影响仍存在争议, 利用能量注入式虚拟质量共振柱, 系统测量了特定形状与粒径的聚碳酸酯颗粒试样的小应变剪切模量和阻尼比。试验结果表明, 颗粒粒径大小对试样的小应变动力学特性影响不大, 而颗粒形状则有显著影响。球形颗粒试样的小应变剪切模量小于椭圆颗粒和双球颗粒的试样, 而球形颗粒试样的小应变阻尼比大于椭圆、双球颗粒试样。椭圆和球形颗粒混合试样的小应变剪切模量和阻尼比则处于两种单一颗粒之间。小应变剪切模量与阻尼比均与颗粒综合规则度存在较好的相关性, 表明综合规则度可用于表征颗粒形状对材料小应变动力特性的影响。

关键词: 颗粒特性; 小应变; 剪切模量; 阻尼比; 共振柱; 综合规则度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)05-0889-09

作者简介: 黄志鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土动力学方面的研究。E-mail: zphuang@zju.edu.cn。

Effects of particle characteristics on small-strain dynamic properties of granular materials

HUANG Zhi-peng¹, WEI Xiao¹, PAN Kun², YANG Zhong-xuan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The small-strain shear modulus and damping ratio are the important dynamic properties of granular soils. Controversial views exist regarding the effects of particle shape and size on the small-strain dynamic properties. In this study, the small-strain shear modulus and damping ratio are measured systematically for the specimens formed by polycarbonate particles with well-controlled particle shape and size using the energy injecting virtual mass resonant column system. The test results show that the particle size has few effects on the small-strain shear modulus and damping ratio, while the particle shape has significant impacts. The shear modulus of the specimens of spherical particles is smaller than that of the elliptical particles and the clumped particles under otherwise similar conditions, while the damping ratio of the specimens of spherical particles is higher than that of the specimens of the other two particles. For the mixtures of spherical and elliptical particles, the small-strain shear modulus and damping ratio are between those of the specimens of each type of particles. The overall regularity, quantifying the shape of the particles, can be used to characterize the small-strain properties of the specimens.

Key words: particle characteristic; small strain; shear modulus; damping ratio; resonant column; overall regularity

0 引 言

土体的剪切模量 G 和阻尼比 D 是土体动力学特性的重要参数, 对分析自然和人为引起的各类振动荷载下的土体响应具有重要意义。 G 、 D 与土体的剪应变 γ 有关^[1], 而土体在小应变条件下 ($\gamma = 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5}$) 基本处于线弹性阶段, 其对应的剪切模量和阻尼比分别为最大模量 G_{\max} 和最小阻尼比 D_{\min} 。其中, G_{\max} 可以由 $G_{\max} = \rho V_s^2$ 得到, 式中, V_s 为土体的剪切波速, ρ 为土体密度。

已有研究表明, 土体 G_{\max} 主要受到围压、孔隙比、

级配特征、土体颗粒形状、应力历史等因素的影响^[2-5]。在诸多因素中, 围压和孔隙比是影响小应变剪切模量的两个重要参数^[3, 6], 通常采用如下表达式:

$$G_{\max} = A \cdot f(e) \cdot \left(\frac{\sigma'}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

式中 A 为拟合参数, 反映土体特性以及其他因素的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51825803, 52020105003); 高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2021QNA4021)

收稿日期: 2021-07-05

***通信作者** (E-mail: weixiaos@zju.edu.cn)

影响; $f(e)$ 为孔隙比函数, 反映孔隙比 e 的影响; σ' 为有效应力; p_a 为参考应力, 取大气压强; n 为幂指数。已有研究表明 G_{\max} 随着不均匀系数 C_u 增大而减小^[3, 7-8]。

已有研究对土体颗粒粒径如何影响 G_{\max} 和 V_s 未有定论。Sharifipour 等^[9]利用弯曲元测试了 3 种不同粒径 (1~3 mm) 玻璃珠试样的剪切波速 V_s , 发现在相近的孔隙比条件下 V_s 随粒径增加而增大。Hardin 等^[10]利用共振柱对砾石土进行测试后发现 G_{\max} 随粒径增大而增大。Menq^[8]发现砾石土的 G_{\max} 随粒径增大而增大, 而砂土的 G_{\max} 受粒径影响不大。Wichtmann 等^[3]测试了一系列不同级配和粒径的砂土和砾石土的 G_{\max} , 发现平均粒径在 0.1~6 mm 范围内变化时 G_{\max} 受粒径影响不大。Dutta 等^[11]、Yang 等^[12]观察到级配均匀的砂土的 V_s 与粒径大小无关。Patel 等^[13]通过弯曲元测试发现玻璃珠试样的 V_s 随粒径增大而减小, 且粉煤灰和炉底灰也表现出此类趋势。

此外, 已有研究关于颗粒形状对 G_{\max} 的影响也存在争议。Hardin 等^[2, 14]对渥太华砂和碎石石英 (Crushed quartz) 的 V_s 与 G_{\max} 进行了测量并指出拟合参数 A 和孔隙比函数 $f(e)$ 与砂土类型相关, 应力指数 n 则不受砂土类型影响。Cho 等^[15]对文献数据进行整理分析后发现, 颗粒形状会对 $V_s - \sigma'$ 关系的拟合参数 (特别是幂指数) 有影响。Payan 等^[16]认为颗粒形状对孔隙比函数的影响可以忽略不计, 但是颗粒规则程度提高会导致参数 A 提高及参数 n 下降。Altuhafi 等^[17]则认为将颗粒形状以外的其他因素影响归一化后, 颗粒越圆润的砂土剪切模量越低。Yang 等^[4]将颗粒形状不同的砂土筛分至统一级配曲线后测试, 证实了 Altuhafi 等^[17]的观点, 并发现 A 随着颗粒形状的综合规则度 (overall regularity, OR) 提高而下降, n 则上升。类似现象也被其他一些学者观察到^[18-20]。

针对不同土体, 袁晓铭等^[21]给出了考虑埋深和应变水平的剪切模量与阻尼比设计表格。其中, 相同应变水平 (包括 $\gamma = 5 \times 10^{-6}$) 下砂土的阻尼比推荐值随密实度和埋深增大而减小。然而, 也有数据显示 D_{\min} 与孔隙比的关系与前述趋势不同^[6, 8]。Menq^[8]认为孔隙比对 D_{\min} 的影响较小且不明确, 建议采用以下公式表征 D_{\min} :

$$D_{\min} = D_1 \left(\frac{\sigma'}{p_a} \right)^{-\kappa}, \quad (2)$$

式中, D_1 为拟合参数, 为有效应力等于一个大气压时的阻尼比, κ 为幂指数。目前, 对粒径如何影响 D_{\min} 的研究存在不一致。Menq^[8]的试验数据表明 D_1 随平均粒径 d_{50} 增加而减小, 但 Shin^[22]发现级配不良的砾

石土与砂土的 D_{\min} 无明显区别。Payan 等^[23]在测量了若干种具有不同级配和平均粒径砂土的 D_{\min} , 发现 D_1 , κ 均与颗粒形状具有较好的关联性。此外, 关于颗粒形状对 D_{\min} 影响的研究鲜有报道。

综上所述, 颗粒形状和粒径对颗粒材料 G_{\max} 与 D_{\min} 的影响仍需进一步研究。考虑到天然材料的颗粒形状和粒径难以精确量化和控制, 本文采用特定形状和粒径的聚碳酸酯材料, 巧妙地分离了颗粒形状与粒径对试样动力特性的影响; 进一步地, 利用能量注入式虚拟质量共振柱精确测量试样的 G_{\max} 与 D_{\min} , 揭示颗粒形状与粒径对二者的影响规律。

1 试验方案

1.1 试验材料

本研究采用聚碳酸酯压模得到特定形状与粒径的颗粒 (图 1), 包括直径 2 mm 的圆球 (S2), 直径 3 mm 的圆球 (S3), 短轴 2 mm、长轴 3 mm 的椭球 (E1), 以及由球心距离 1 mm 的两个直径 2 mm 球体重叠形成的双球颗粒 (C1)。颗粒的比重利用排水法测得为 1.19。本研究除了测试 4 种颗粒组成的试样的小应变动力特性外, 还将 S3 与 E1 颗粒以质量比 2:1 或 1:2 混合 (分别记为 S3:E1=2:1 和 S3:E1=1:2), 以研究不同形状颗粒混合对试样小应变动力特性的影响。根据相关资料, 聚碳酸酯材料的杨氏模量和泊松比分别为 2.30 GPa 和 0.39。

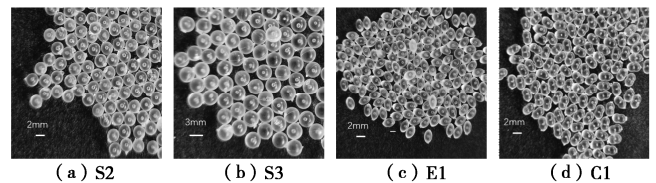


图 1 本研究所采用的聚碳酸酯颗粒

Fig. 1 Poly carbonate particles used in this study

已有研究提出了多种参数来定量描述颗粒形状^[15, 17]。本研究采用的形状参数与 Liu 等^[4]一致, 包括球度 (sphericity, S)、长细比 (aspect ratio, AR)、圆度 (roundness, R)、凸度 (convexity, C), 其计算公式如下:

$$S = 2\pi R_c / P, \quad (3)$$

$$AR = D^{F_{\min}} / D^{F_{\max}}, \quad (4)$$

$$R = \sum (r_i / N) / r_{\max}, \quad (5)$$

$$C = A / A_{\text{hull}}. \quad (6)$$

式中 R_c 为与颗粒投影面积相等的圆形半径, P 为投影周长 (图 2 (a)); $D^{F_{\min}}$ 与 $D^{F_{\max}}$ 分别为颗粒投影的一对平行切线的最小和最大间距 (图 2 (b)); r_i 为突出角点的曲率半径, N 为突出角点数目, r_{\max} 为投影

的最大内接圆半径 (图 2 (c)); A 为投影面积, A_{hull} 为投影凹陷被填充后的面积 (图 2 (d)). 各颗粒的形状参数见表 1. 上述 4 个形状参数仅反映颗粒某一方面的形状特征, 为了综合表征颗粒的形状特征, Liu 等^[4]提出的综合规则度 (OR) 表征颗粒形状, 如下式所示:

$$\text{OR} = (S + \text{AR} + R + C) / 4 \quad . \quad (7)$$

对于混合颗粒 (S3:El=2:1 和 S3:El=1:2), 其形状可用两种组分的形状参数按混合比例求加权平均得到。

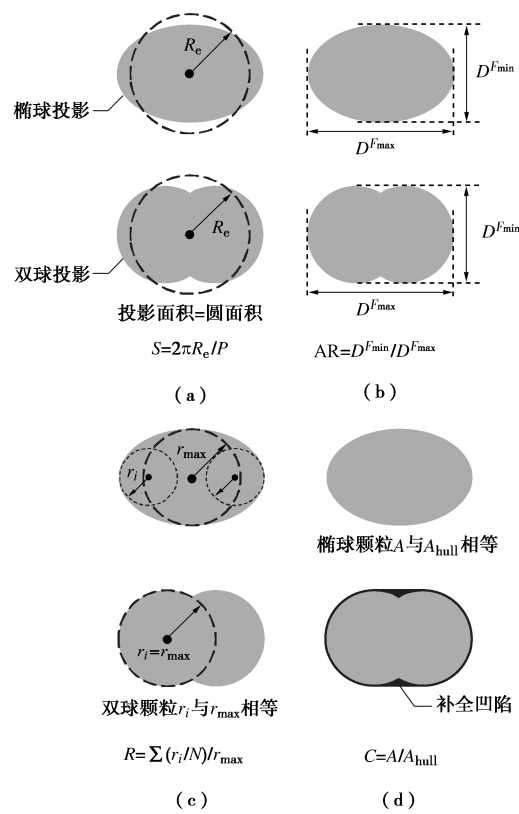


图 2 形状参数的定义与计算方法示意图

Fig. 2 Schematics of calculation of shape parameters

表 1 颗粒形状参数表

Table 1 Shape quantities of particles

| 颗粒种类 | 球度 S | 长细比 AR | 圆度 R | 凸度 C | 综合规则度 OR |
|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|----------------------|
| S2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| S3 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| El | 0.97 | 0.67 | 0.67 | 1.00 | 0.83 |
| Cl | 0.95 | 0.67 | 1.00 | 0.98 | 0.90 |
| S3:El=2:1 | 0.99 | 0.89 | 0.89 | 1.00 | 0.94 |
| S3:El=1:2 | 0.98 | 0.78 | 0.78 | 1.00 | 0.88 |

1.2 试验仪器

本文采用能量注入式虚拟质量 (energy injecting virtual mass, EIVM) 共振柱系统^[24-25] (图 3) 对材料

的小应变动力特性进行测量。该共振柱系统可以简化为图 4 中的试样与顶部质量块, 其共振频率同时受到试样刚度以及质量块的极质量惯性矩的影响。当系统在外扭矩作用下受迫振动时, 该扭矩可根据达朗贝尔原理等效为附加质量惯性矩, 相当于对系统增加一个虚拟质量块, 从而改变了系统的共振频率。因此, 可以通过施加不同频率的扭矩使系统在不同频率下产生共振, 并依据原系统参数、系统共振频率以及试样尺寸得到试样的剪切模量。同时, 如果外部扭矩为系统注入的能量等于系统耗散的能量, 系统维持稳定振动, 可通过施加的能量求得阻尼值。

相比于其他常见的共振柱测试系统, 本文采用的 EIVM 共振柱系统主要有两方面优势^[25-26]: ①其他共振柱系统需要通过较多的前期扫频振动确认共振频率, 可能改变试样的 G_{max} 和 D_{min} , 而 EIVM 系统仅需 10~20 个振动周期即可获得稳定波形, 并得到试样的 G_{max} 和 D_{min} ; ②其他共振柱系统的阻尼比测量基于振动衰减过程或者半功率带宽法, 难以准确定义其对应的剪应变幅值, 而 EIVM 系统通过对土样施加扭矩以维持等幅值振动, 所测阻尼比对应的剪应变明确。

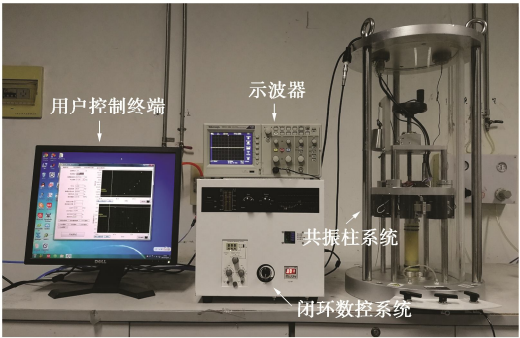


图 3 能量注入式虚拟质量共振柱设备

Fig. 3 EIVM resonant column testing system

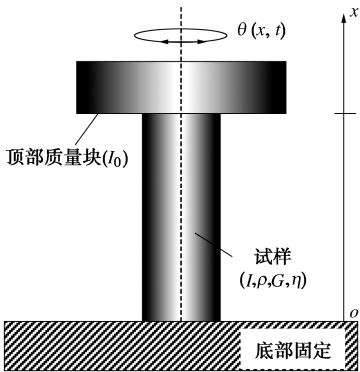


图 4 能量注入式虚拟质量共振柱系统示意图

Fig. 4 Schematics of EIVM resonant column system

1.3 试验步骤

试验采用直径 38 mm、高度 81 mm 的圆柱试样。

将洗净风干后的颗粒通过漏斗分 3 层倒入模具内，并通过控制颗粒的下落高度获得不同密实度的试样；对于较密实的试样，还可用橡胶棒敲击模具侧壁进一步提高试样密实度。制样完毕后，对试样施加 25 kPa 负压，拆除模具，测量试样的实际高度与直径。随后，安装压力室，对试样依次施加 50, 100, 200, 400 kPa 围压，并保持试样孔隙与大气连通；在每级围压加载结束后测量试样的小应变动力特性。测试条件如表 2 所示。

表 2 试验方案表
Table 2 Test schemes

| 颗粒种类 | 试样孔隙比 | 有效应力 /kPa |
|-------------------|-------------------------|----------------|
| S2 | 0.580/0.605/0.635/0.665 | 50/100/200/400 |
| S3 | 0.580/0.607/0.638/0.667 | 50/100/200/400 |
| E1 | 0.500/0.550/0.575/0.604 | 50/100/200/400 |
| C1 | 0.500/0.551/0.571/0.603 | 50/100/200/400 |
| S3 : E1 =2 : 1 | 0.605 | 50/100/200/400 |
| S3 : E1 =1 : 2 | 0.605 | 50/100/200/400 |

2 试验结果与分析

2.1 初始状态对小应变动力特性的影响

4 种单一颗粒的 G_{\max} 均随着孔隙比的减小、围压的增加而增加（图 5, 6），并可利用式（1）进行表征，其中孔隙比函数 $f(e)$ 可采用如下形式^[2, 27]：

$$f(e) = \frac{(a - e)^2}{1 + e}, \quad (8)$$

式中， a 为拟合参数。Hardin 等^[2, 27]认为参数 a 的取值与颗粒形状有关：颗粒形状圆润的天然渥太华砂取 $a = 2.17$ ，而形状尖锐的粉碎渥太华砂取 $a = 2.97$ 。对于本文研究所测数据，若假定参数 a 随颗粒特性改变，S2 与 S3 的拟合结果分别为 $a = 2.40$ 与 $a = 2.35$ ，E1 与 C1 则为 $a = 3.17$ 和 $a = 3.48$ 。实际上，已有研究指出具有不同特性的颗粒材料可采用固定的 a 值^[4]。根据本文试验结果，取 $a = 2.97$ 能得到很好的拟合效果（图 5 虚线）。表 3 总结了 $a = 2.97$ 以及 a 随不同颗粒变化时的参数 A 拟合值，参数 A 和 a 的取值存在相关性。该现象亦被其他学者观察到^[3]。

有效应力的影响如图 6 所示，拟合所得应力幂指数 n 总结于表 3。其中，S2 和 S3 的 n 取值接近，表明粒径对 n 值几乎无影响；而 S2 和 S3 的 n 值大于 E1 和 C1 两种颗粒，该结果表明应考虑颗粒形状的影响。

表 3 G_{\max} 拟合参数表

Table 3 Fitting parameters of G_{\max}

| 类别 | 颗粒种类 | A /MPa | a | n | R^2 |
|--------|---------------|-------------|------|-------|-------|
| a 固定 | S2 | 7.16 | 2.97 | 0.410 | 0.998 |
| | S3 | 7.13 | 2.97 | 0.411 | 0.998 |
| | E1 | 8.72 | 2.97 | 0.378 | 0.998 |
| | C1 | 8.35 | 2.97 | 0.392 | 0.998 |
| | S3 : E1=2 : 1 | 7.51 | 2.97 | 0.396 | 0.997 |
| | S3 : E1=1 : 2 | 8.13 | 2.97 | 0.380 | 0.997 |
| a 可变 | S2 | 12.54 | 2.40 | 0.409 | 0.999 |
| | S3 | 13.20 | 2.35 | 0.411 | 0.999 |
| | E1 | 7.44 | 3.17 | 0.378 | 0.998 |
| | C1 | 5.70 | 3.48 | 0.393 | 0.999 |

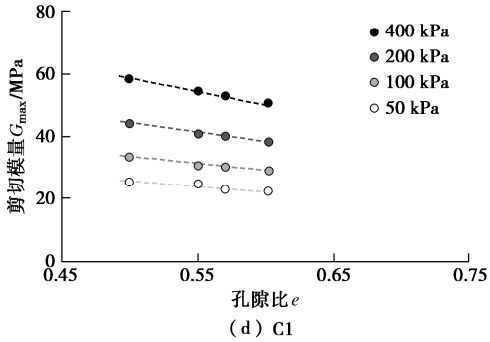
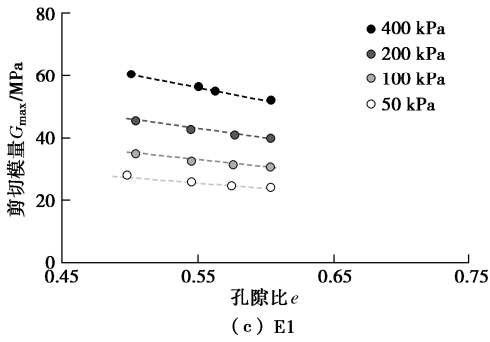
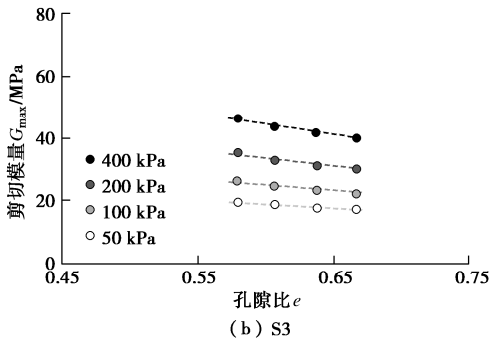
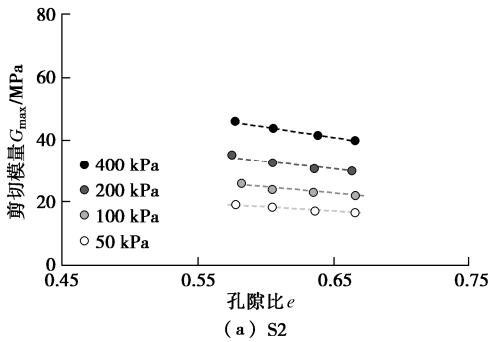


图 5 孔隙比对材料 G_{\max} 的影响

Fig. 5 Effects of void ratio on G_{\max} of test materials

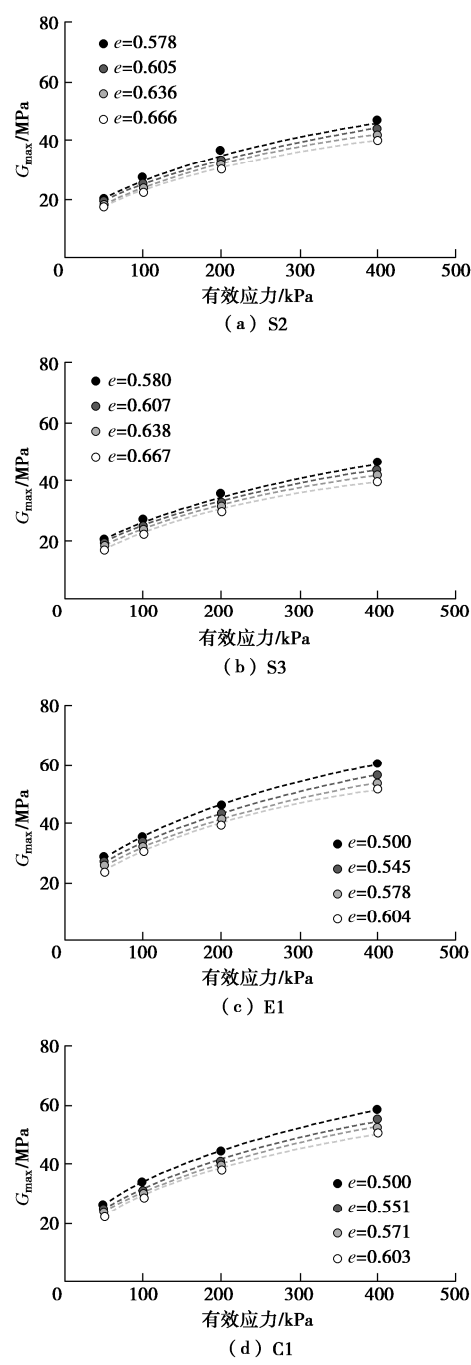


图 6 有效应力对材料 G_{\max} 的影响

Fig. 6 Effects of effective stress on G_{\max} of test materials

孔隙比对小应变阻尼比 D_{\min} 的影响如图 7 所示。在相同有效应力条件下, 各试样的 D_{\min} 随孔隙比增加在一定范围内波动。类似地, Menq^[8]和 Senetakis 等^[6]未观察到 D_{\min} 与孔隙比存在明显的定量关系, 故认为孔隙比对 D_{\min} 的影响可以忽略不计。图 7 中虚线代表各有效应力下 D_{\min} 的平均值, 且平均值随有效应力增加而下降。进一步地, 图 8 展示 4 种材料的 D_{\min} 随有效应力的变化趋势, 并用式 2 拟合得到图中趋势线, 拟合参数见表 4。

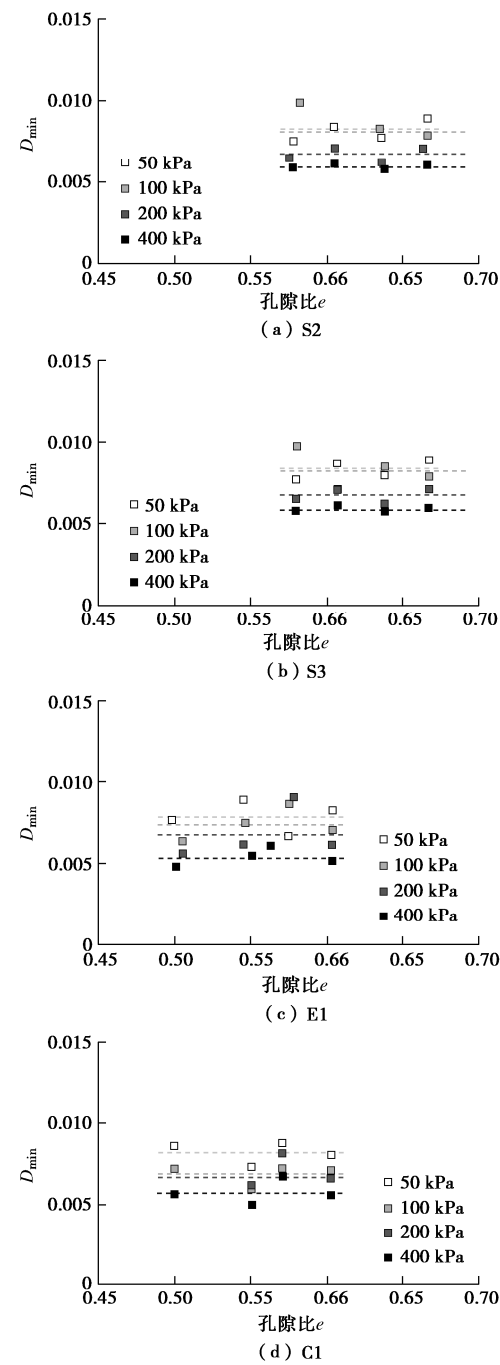


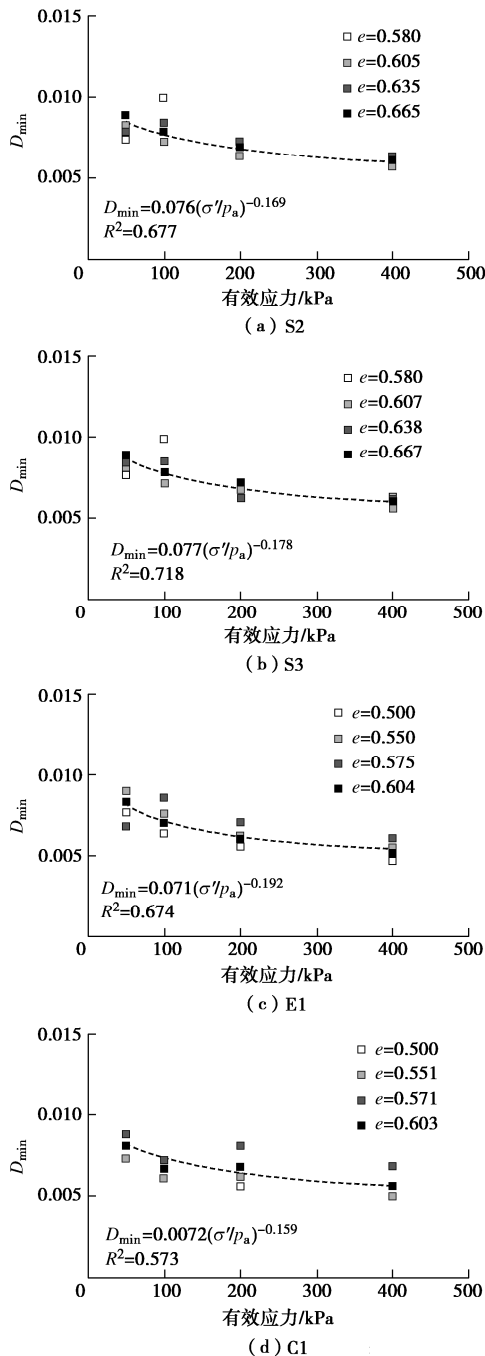
图 7 孔隙比对材料 D_{\min} 的影响

Fig. 7 Effects of void ratio on D_{\min} of test materials

表 4 D_{\min} 拟合参数表

Table 4 Fitting parameters of D_{\min}

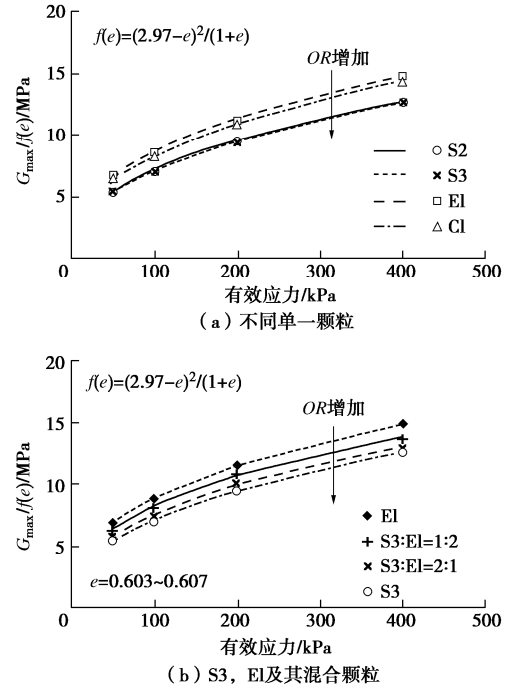
| 颗粒种类 | D_1 | κ | R^2 |
|---------------|--------|----------|-------|
| S2 | 0.0076 | 0.169 | 0.677 |
| S3 | 0.0077 | 0.178 | 0.718 |
| E1 | 0.0071 | 0.192 | 0.674 |
| C1 | 0.0072 | 0.159 | 0.573 |
| S3 : E1=2 : 1 | 0.0071 | 0.151 | 0.962 |
| S3 : E1=1 : 2 | 0.0068 | 0.176 | 0.997 |

图8 有效应力对材料 D_{\min} 的影响Fig. 8 Effects of effective stress on D_{\min} of test materials

2.2 颗粒特性对小应变动力特性的影响

不同颗粒形状和粒径的试样具有不同的孔隙比范围, 可采用 $G_{\max}/f(e)$ 消除孔隙比对 G_{\max} 的影响。如图9所示, $G_{\max}/f(e)$ 随有效应力增加而增加, 且不同颗粒在相同有效应力下具有不同的 $G_{\max}/f(e)$ 。值得注意的是, S2 与 S3 的数据点几乎重合 (图9(a)), 表明颗粒直径从 2 mm 增大到 3 mm 对球状颗粒的 G_{\max} 几乎无影响, 与一些学者^[3, 11-12] 的试验结果相吻合。在相同有效应力条件下, C1 试样的 $G_{\max}/f(e)$ 略小于 E1 而大于球形颗粒 S2 与 S3 (图9(a))。考虑到 E1 与 C1 的 $D_{\min}^{F_{\min}}$ (2 mm) 与 $D_{\min}^{F_{\max}}$ (3 mm) 介于 S2 和 S3 的粒径

之间, 而颗粒粒径不会影响 $G_{\max}/f(e)$, 上述试样的 $G_{\max}/f(e)$ 差异可以认为是颗粒形状差异所致。图9(b)将混合颗粒的测试结果与两种单一组分的结果进行对比, 可以看出混合颗粒的 $G_{\max}/f(e)$ 处于 S3 与 E1 之间, 并且曲线随 E1 含量增加而向上移动。

图9 颗粒特性对材料 G_{\max} 的影响Fig. 9 Effects of particle characteristics on G_{\max} of materials

参数 A 随着综合规则度 OR 的增大而减小 (图10(a)), 表明当试样的孔隙比和有效应力相同时, 颗粒形状越规则, 试样的 G_{\max} 越小; 参数 n 随着 OR 的增大而增大, 表明颗粒形状越规则的试样 G_{\max} 对有效应力的敏感性越高 (图10(b))。

与图9, 10所示结果相似, Liu等^[4]将4种石英砂筛至相同级配后 ($C_u = 1.2$, $D_{50} = 0.256$ mm) 测量试样的 G_{\max} , 发现在相同的孔隙比和有效应力下, 颗粒形状越规则, 试样的 G_{\max} 越小; 并从微观力学角度解释该现象, 认为颗粒形状越规则, 则其试样在相同孔隙比和有效应力下的配位数越小, 导致试样 G_{\max} 越小。此外, Liu等^[4]用式(1)拟合 G_{\max} 与孔隙比、有效应力的关系; 参数 A 随 OR 的增大而减小, 而参数 n 随着 OR 的增大而增大, 与本文结论一致。与本文结论不一致的部分文献将在后文中讨论。

取孔隙比接近 ($e = 0.603 \sim 0.607$) 的各组试样 D_{\min} 进行对比 (图11)。如图11(a), S2 与 S3 试样的数据点和趋势线基本重合, 表明粒径对试样 D_{\min} 的影响可以忽略; 而 E1 的数据处于4种单一颗粒的最下方、C1 则处于球形颗粒与 E1 颗粒之间, 表明颗粒形状的规则程度降低, 会使试样的 D_{\min} 降低。图11(b)显

示混合颗粒试样的 D_{\min} 介于两种单一组分之间, 亦表明颗粒形状的规则程度降低会导致试样 D_{\min} 降低。利用式 (2) 对图 11 所示的数据进行拟合, 并将拟合参数与 OR 关联, 可发现参数 D_1 随着 OR 的增大呈现增大趋势 (图 12 (a)), 而参数 κ 随 OR 增大呈现减小趋势 (图 12 (b))。目前, 文献中对于颗粒粒径和形状如何影响试样的 D_{\min} 尚有争论, 将在后文进行讨论。

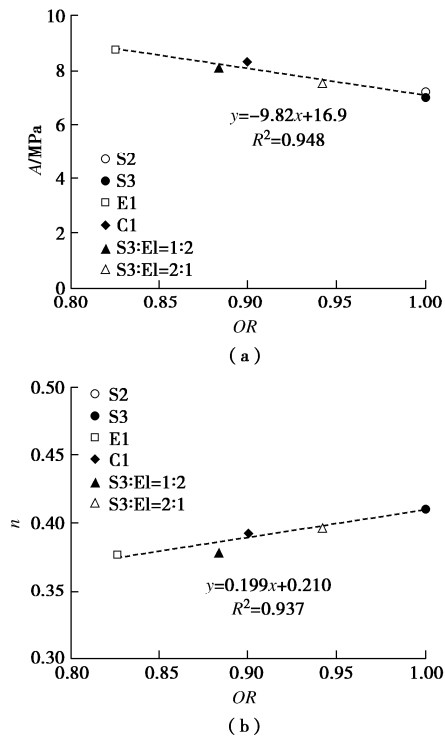


图 10 颗粒形状对材料 G_{\max} 的影响

Fig. 10 Effects of particle shape on G_{\max} of test materials

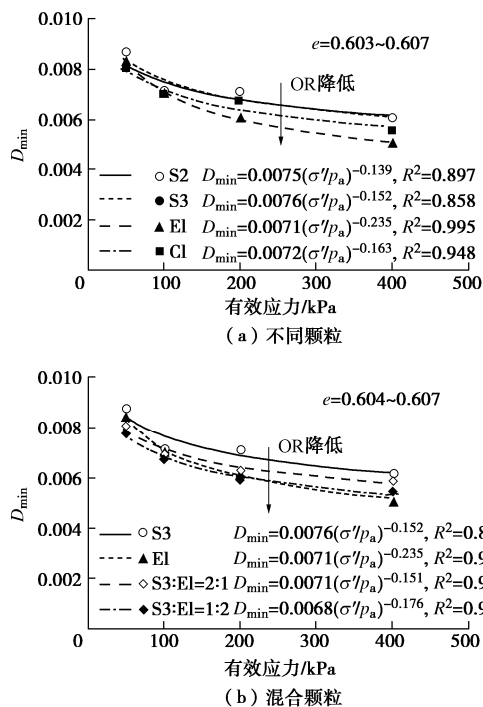


图 11 颗粒特性对材料 D_{\min} 的影响

Fig. 11 Effects of particle characteristics on D_{\min} of materials

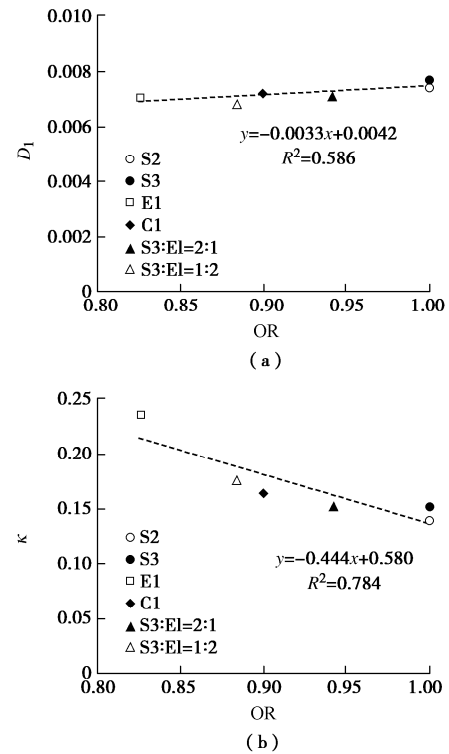


图 12 颗粒形状对材料 D_{\min} 的影响

Fig. 12 Effects of particle shape on D_{\min} of test materials

3 讨 论

本研究采用能量注入式虚拟质量 (EIVM) 共振柱研究了不同颗粒特性对试样小应变动力特性的影响。试验结果表明颗粒形状越规则试样 G_{\max} 越小, D_{\min} 越大, 与 Liu 等^[4]采用均匀级配 (不均匀系数 $C_u = 1.2$) 的砂土试验结果一致。当考虑不同级配影响时, Altuhafi 等^[17]对文献报道的各类砂土的 G_{\max} 进行了考虑级配和粒径的归一化处理, 并与颗粒形状参数 (球度、长细比、凸度) 关联性进行分析, 发现归一化后的剪切模量随颗粒形状参数的增加而减小, 与本文结果一致; 而 Payan 等^[16]对其所测的几种砂土的 G_{\max} 进行考虑级配的归一化处理, 其得到的趋势则相反。不一致的原因主要有以下 3 方面。①Altuhafi 等^[17]和 Payan 等^[16]所采用的形状参数不同, 可能对分析结果造成一定影响; ②Altuhafi 等^[17]和 Payan 等^[16]则分别假定数据库中 G_{\max} 正比于 C_u^{-1} 和 $C_u^{-1.4}$, 而 G_{\max} 与 C_u 的量化关联因数据库不同而发生变化、并无定论 (例如 Liu 等^[28]认为 G_{\max} 正比于 $C_u^{-0.42}$), 因此 Altuhafi 等^[17]和 Payan 等^[16]基于某个假定的关联可能会影响分析结果; ③已有研究一般认为级配和颗粒形状对 G_{\max} 的影响相互间不耦合, 但是并没有充分依据。因此, 有必要综合考虑颗粒形状和级配对颗粒材料 G_{\max} 的影响开展进一步研究。

Menq^[8]的试验数据表明 D_1 随平均粒径 d_{50} 增加而减小, 然而本研究数据表明颗粒粒径对材料的 D_{\min} 几乎没有影响。事实上, 前者并未精确量化测试材料的颗粒形状, 因而无法合理评价 d_{50} 的影响。此外, Payan 等^[23]对 D_{\min} 试验数据拟合所得的参数 D_1 关于 d_{50} 与 C_u 进行归一化处理后, 发现归一化的参数 D_1 随颗粒形状规则度增加而减小, 与图 12 的结果相反。值得注意的是, 在拟合 D_1 与形状的关系时, Payan 等^[23]采用了 Menq^[8]所提出的与 d_{50} 和 C_u 的经验关系以排除这两个因素的影响, 却并未验证 Menq^[8]的经验关系是否适用于该组试验数据, 且目前对于 d_{50} 和 C_u 如何影响 D_{\min} 尚无定论: Menq^[8]的试验数据表明 D_1 随不均匀系数 C_u 减小而减小, 但是 Senetakis 等^[6]则未观察到 C_u 对 D_{\min} 的一致影响; Menq^[8]的试验数据表明 D_1 随平均粒径 d_{50} 增加而减小, 而本研究数据表明颗粒粒径对材料的 D_{\min} 几乎没有影响。因此, 还需进一步综合考虑颗粒级配、粒径和形状, 开展相关研究。

4 结 论

本文采用能量注入式虚拟质量 (EIVM) 共振柱在不同有效应力、不同孔隙比条件下测试了具有特定形状和粒径的聚碳酸酯颗粒制成试样的小应变剪切模量 G_{\max} 和阻尼比 D_{\min} , 并对现有文献中的争议进行了讨论并对后续工作提出了建议。

(1) 试验结果表明不同形状的聚碳酸酯颗粒所成试样的 G_{\max} 随孔隙比减小和有效应力增加而增加; 试样的 D_{\min} 与孔隙比的关系不明显, 却随着有效应力增加而减小。

(2) 对于所测试的球形颗粒试样, 颗粒粒径对 G_{\max} 和 D_{\min} 几乎没有影响, 颗粒形状则影响试样的 G_{\max} 和 D_{\min} 。当孔隙比和有效应力相同时, 椭球颗粒试样的 G_{\max} 最大, 双球颗粒试样次之, 球形颗粒试样的 G_{\max} 最小; D_{\min} 则呈现相反的趋势。对于椭球颗粒和球形颗粒的混合材料, 试样 G_{\max} 和 D_{\min} 介于二者之间。

(3) 颗粒形状的综合规则度 (OR) 可用于表征颗粒形状对颗粒材料 G_{\max} 与 D_{\min} 的影响。

参考文献:

- [1] ISHIHARA K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics[M]. New York: Oxford University Press, 1996.
- [2] HARDIN B O, RICHART F E Jr. Elastic wave velocities in granular soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, **89**(1): 33 - 65.
- [3] WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS T. Influence of the

- grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus G_{\max} [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(10): 1404 - 1418.
- [4] LIU X, YANG J. Shear wave velocity in sand: effect of grain shape[J]. Géotechnique, 2018, **68**(8): 742 - 748.
- [5] GU X Q, YANG J, HUANG M S. Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element[J]. Soils and Foundations, 2013, **53**(5): 735 - 745.
- [6] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. The small-strain shear modulus and damping ratio of quartz and volcanic sands[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, **35**(6): 20120073.
- [7] IWASAKI T, TATSUOKA F. Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands[J]. Soils and Foundations, 1977, **17**(3): 19 - 35.
- [8] MENQ F Y. Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2003.
- [9] SHARIFIPOUR M, DANO C, HICHER P. Wave velocities in assemblies of glass beads using bender-extender elements[C]// Proceedings of 17th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2004, Newark.
- [10] HARDIN B O, KALINSKI M E. Estimating the shear modulus of gravelly soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(7): 867 - 875.
- [11] DUTTA T T, OTSUBO M, KUWANO R, et al. Stress wave velocity in soils: apparent grain-size effect and optimum input frequencies[J]. Géotechnique Letters, 2019, **9**(4): 340 - 347.
- [12] YANG J, GU X Q. Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size?[J]. Géotechnique, 2013, **63**(2): 165 - 179.
- [13] PATEL A, BARTAKE P, SINGH D. An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, **32**(1): 1 - 10.
- [14] HARDIN B O. Dynamic versus static shear modulus for dry sand[J]. Materials Research and Standards, 1965, **5**(5): 232 - 235.
- [15] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(5): 591 - 602.
- [16] PAYAN M, KHOSHGHALB A, SENETAKIS K, et al. Effect of particle shape and validity of G_{\max} models for sand: a

- critical review and a new expression[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **72**: 28 – 41.
- [17] ALTUHAFI F N, COOP M R, GEORGIANNOU V N. Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, **142**(12): 04016071.
- [18] 曾国熙, 顾尧章, 吴建平. 粉煤灰的动剪切模量[J]. *岩土工程学报*, 1985, **7**(5): 1 – 9. (ZENG Guo-xi, GU Rao-zhang, WU Jian-ping. Dynamic shear moduli of fly ashes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, **7**(5): 1 – 9. (in Chinese))
- [19] SHIN H, SANTAMARINA J C. Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(2): 353 – 355.
- [20] ATHANASSIADIS A G, MISKIN M Z, KAPLAN P, et al.. Particle shape effects on the stress response of granular packings[J]. *Soft Matter*, 2014, **10**(1): 48 – 59.
- [21] 袁晓铭, 孙 锐, 孙 静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, **20**(4): 133 – 139. (YUAN Xiao-ming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, **20**(4): 133 – 139. (in Chinese))
- [22] SHIN B. Laboratory Investigation of the Stiffness and Damping Properties of Binary and Gap-Graded Mixtures of Granular Soils[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2019.
- [23] PAYAN M, SENETAKIS K, KHOSHGHALB A, et al. Influence of particle shape on small-strain damping ratio of dry sands[J]. *Géotechnique*, 2016, **66**(7): 610 – 616.
- [24] LI X S, YANG W L, SHEN C K, et al. Energy-injecting virtual mass resonant column system[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(5): 428 – 438.
- [25] YANG Z X, WEN Y X, PAN K. Previbration signature on dynamic properties of dry sand[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, **47**(3): 2167 – 2192.
- [26] 蔡正银, 李相崧. 材料状态对干砂小应变特性的影响[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(1): 10 – 14. (CAI Zheng-yin, LI Xiang-song. Effects of material state on the small strain behavior of dry sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(1): 10 – 14. (in Chinese))
- [27] HARDIN B O, BLACK W L. Sand stiffness under various triaxial stresses[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1966, **92**(2): 27 – 42.
- [28] LIU X, YANG J, WANG G H, et al. Small-strain shear modulus of volcanic granular soil: an experimental investigation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **86**: 15 – 24.