

DOI: 10.11779/CJGE20230390

# 颗粒表面粗糙度对材料小应变动力特性的影响

张涛<sup>1,3</sup>, 吴健<sup>2</sup>, 魏骁<sup>1,3</sup>, 杨仲轩<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江交工地下工程有限公司, 浙江 杭州 310051;

3. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058)

**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, 不仅受到土体密实度和应力状态的影响, 还受到土体颗粒级配、形状等颗粒特征的影响。颗粒表面粗糙度是重要的土体颗粒特征之一, 然而关于颗粒表面粗糙度对土体小应变动力特性影响的研究较为匮乏。利用能量注入式虚拟质量共振柱设备, 系统地测试了颗粒表面粗糙度不同的玻璃珠所成试样的小应变剪切模量和阻尼比; 采用三维干涉显微镜测量了玻璃珠的表面粗糙度, 并量化表征粗糙度对试样小应变剪切模量和阻尼比的影响。试验结果表明, 在相同孔隙比和有效应力条件下, 试样的小应变剪切模量随颗粒表面粗糙度增大而减小, 而小应变阻尼比受颗粒表面粗糙度影响的规律不明显。研究结果表明, 当材料的颗粒形状、级配等因素相近时, 颗粒表面粗糙度对材料小应变剪切模量的影响不应被忽略。

**关键词:** 表面粗糙度; 颗粒材料; 小应变; 剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)08-1783-08

**作者简介:** 张涛(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: zhangtaot@zju.edu.cn。

## Effects of surface roughness of particles on small-strain dynamic properties of granular materials

ZHANG Tao<sup>1,3</sup>, WU Jian<sup>2</sup>, WEI Xiao<sup>1,3</sup>, YANG Zhongxuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Jiaogong Underground

Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China; 3. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The small-strain shear modulus and damping ratio are the important dynamic properties of granular soils, which are influenced by the packing density and stress states of the soil element as well as the particle characteristics including gradation, shape of particles, etc. As one of the important particle characteristics, however, the surface roughness of particles is often ignored by the previous investigations regarding the small-strain dynamic properties of granular soils. In this study, the small-strain dynamic properties of specimens of glass beads with different surface roughnesses are measured using the energy injecting virtual mass resonant column system. The surface roughness of the glass beads is quantified with the assistance of the three-dimensional interference microscope. The experimental results show that the small-strain shear modulus decreases with the increasing surface roughness of particles, while there is no obvious effects of surface roughness on the small-strain damping ratio. Clearly, the effects of surface roughness on the small-strain dynamic properties cannot be ignored particularly when other influencing factors, such as particle shape and gradation, are similar.

**Key words:** surface roughness; granular material; small strain; shear modulus; damping ratio

## 0 引言

小应变剪切模量  $G_{\max}$ 、剪切波速  $v_s$  ( $G_{\max} = \rho(v_s)^2$ ,  $\rho$  为土体密度)以及小应变阻尼比  $D_{\min}$  是表征土体动力学特性的重要参数, 被广泛应用于各类岩土工程设计与分析中。大量的试验研究表明土的  $G_{\max}$  随土体密实度和有效应力的增加而增加<sup>[1-3]</sup>, 同时还受到多种颗粒特征(粒径、级配、颗粒形状等)的影响<sup>[2-5]</sup>。有学者研究了土体颗粒级配的不均匀系数  $C_u$  对  $G_{\max}$  的影响<sup>[2]</sup>, 发现在相同的孔隙比和有效应力条件下,  $G_{\max}$  随  $C_u$

增加而减小。此外, 学者们也发现当孔隙比和有效应力相同时, 颗粒形状越规则的土体  $G_{\max}$  越小<sup>[3, 5]</sup>。

颗粒表面粗糙度同土体其它颗粒特征一样, 与土体经历的风化、搬运、沉积等地质过程有关。例如, Mitchell 等<sup>[6]</sup>指出石英砂在海滩环境中容易呈现出较

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2022C03180); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52108351); 浙江省建设厅项目(2022K073); 浙江交工协同创新联合研究中心项目(ZDJG2021001)

收稿日期: 2023-05-10

\*通信作者(E-mail: weixiaos@zju.edu.cn)

为光滑的颗粒表面, 风积砂则具有较为粗糙的颗粒表面。虽然以往研究常忽略表面粗糙度的作用, 但仍然有少数研究者发现不同的表面粗糙度会在一定程度上影响土体的多种力学特性<sup>[7-8]</sup>。Santamarina 等<sup>[8]</sup>发现表面粗糙度增大使钢珠制成试样的峰值剪切强度以及残余强度提高, 但同时也使其  $G_{\max}$  减小。Sharifipour 等<sup>[9]</sup>和 Otsubo 等<sup>[10]</sup>利用弯曲元测试获得了玻璃珠试样的  $G_{\max}$ , 发现  $G_{\max}$  随玻璃珠的表面粗糙度增大而减小。目前, 尽管学者们关于颗粒表面粗糙度对试样  $G_{\max}$  的影响已有初步认识, 但相关试验数据较少、研究仍存在不足。Sharifipour 等<sup>[9]</sup>和 Otsubo 等<sup>[10]</sup>的数据表明颗粒表面粗糙度对  $G_{\max}$  的影响与试样所受有效应力  $\sigma'$  大小有关: 当有效应力较小时, 颗粒表面粗糙度造成的  $G_{\max}$  差异较大, 而当有效应力逐渐增大时, 颗粒表面粗糙度造成的  $G_{\max}$  差异呈现逐渐减小的趋势。但 Santamarina 等<sup>[8]</sup>的试验结果并未明显呈现类似现象。此外, 现有研究尚未提出能够合理量化表征颗粒表面粗糙度对  $G_{\max}$  影响的方法。Santamarina 等<sup>[8]</sup>和 Sharifipour 等<sup>[9]</sup>均未对表面粗糙度进行测量。Otsubo 等<sup>[10]</sup>提出利用均方根粗糙系数  $S_q$  表征颗粒表面粗糙度, 并采用经颗粒半径 ( $R$ ) 归一化的粗糙系数 ( $S_q/R$ ) 表征粗糙度对  $G_{\max}$  的影响, 但是该方法并未经过其他数据的验证。

目前, 已有较多文献揭示了  $D_{\min}$  随土体孔隙比和有效应力的变化规律, 一般认为孔隙比对  $D_{\min}$  的影响较小且可以忽略, 而  $D_{\min}$  随有效应力增加而减小<sup>[5]</sup>。然而, 关于颗粒表面粗糙度如何影响试样  $D_{\min}$  的研究较为缺乏。Sharifipour 等<sup>[9]</sup>与 Otsubo 等<sup>[10]</sup>虽然采用弯曲元设备测试了试样的  $G_{\max}$  并研究了  $G_{\max}$  随颗粒表面粗糙度的变化规律, 但是未能得到试样的  $D_{\min}$ 。Santamarina 等<sup>[8]</sup>使用共振柱测试了不同粗糙度钢珠的  $D_{\min}$ , 发现粗糙钢珠的  $D_{\min}$  不随有效应力的改变发生变化, 该现象与部分试验中  $D_{\min}$  随有效应力增加而减小的现象相矛盾。因此, 有必要对表面粗糙度如何影响  $D_{\min}$  开展进一步研究。

本文采用表面粗糙度不同的玻璃珠作为试验材料, 利用能量注入式虚拟质量共振柱装置测试玻璃珠所制成试样的  $G_{\max}$  与  $D_{\min}$ 。利用三维干涉显微镜对颗粒表面粗糙度进行测量, 并采用均方根粗糙系数  $S_q$  对粗糙度进行量化, 揭示颗粒表面粗糙度对试样小应变动力特性的影响规律。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

本研究采用 2 mm 玻璃珠作为试验材料, 其相对

质量密度为 2.57, 杨氏模量约为 60 GPa (由供应商提供)。由于砂土的小应变动力特性受包括形状、级配等因素的影响, 而采用天然砂土难以较好控制这些因素, 因此采用形状规则、粒径均一的玻璃珠可以排除颗粒形状和级配的影响。将玻璃珠与 600 目金刚砂按照质量比 2 : 1 混合后分别打磨 2, 4 h, 得到不同表面粗糙度的玻璃珠。将未打磨、打磨 2 与打磨 4 h 的玻璃珠分别命名为 GB-2-A、GB-2-B、GB-2-C。利用动态颗粒图像分析仪 QICPIC 测得几种玻璃珠的不均匀系数  $C_u$  均为 1.02。通过光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 观察 3 种玻璃珠的图像见图 1。图 1 (a) 为 3 种玻璃珠在光学显微镜下的图像, 可以看出未经打磨的 GB-2-A 表面光滑、晶莹透光, GB-2-B 和 GB-2-C 的玻璃光泽随打磨时间增加而减弱, 表明打磨时间增加导致玻璃珠表面更粗糙。图 1 (b) 为 3 种玻璃珠在扫描电镜下的单颗粒图像, 可以看出打磨后的玻璃珠形状并无显著变化。图 1 (c) 为 3 种玻璃珠表面的局部放大图 (在单颗粒 SEM 图像基础上放大约 30 倍所得), 可明显看出 3 种玻璃珠的表面粗糙程度不同, 颗粒表面因为打磨产生的缺损随打磨时间增加而增加 (红色虚线框中为表面缺损位置)。

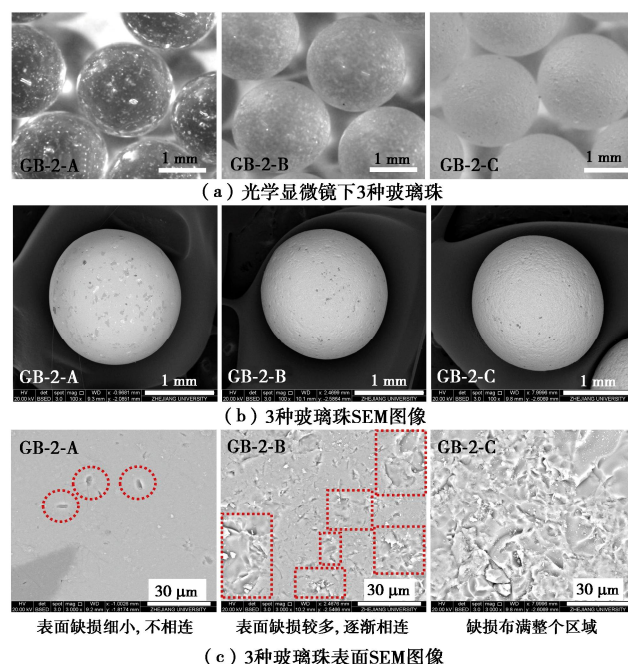


图 1 不同打磨时长的玻璃珠在光学显微镜与扫描电镜下图像

Fig. 1 Images of glass beads subjected to different durations of abrasion obtained by optical and scanning electron microscopes

### 1.2 颗粒表面粗糙度测试

本研究采用 Veeco-NT9100 三维干涉显微镜观测颗粒表面纹理。该设备的工作原理如下: 光源发出的光束经分光板分为两束, 分别被参考镜面与样品表面反射后发生干涉; 设备对干涉条纹进行解析后得到样

品表面的三维形态。本文采用  $63\ \mu\text{m} \times 47\ \mu\text{m}$  的矩形观测区域,平面分辨率为  $0.1\ \mu\text{m}$ ,纵向测量精度  $0.1\ \text{nm}$ 。由于测试区域为球形曲面,表征表面粗糙度时需要利用软件内置的曲面函数消除曲面效应。消除曲面效应后的3种2 mm玻璃珠表面三维形态以及 $x$ -方向、 $y$ -方向剖面相对参考平面的距离见图2(参考平面高度为消除曲面效应后所有像素点测量值的平均值)。利用均方根粗糙系数  $S_q$  表征表面的粗糙特征<sup>[7,10]</sup>。受测区域的  $S_q$  计算公式如下:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_i^2} \quad (1)$$

式中:  $m$  为  $63 \times 47\ \mu\text{m}$  的矩形内像素点的数目;  $Z_i$  为第  $i$  个像素点至参考平面的距离。每种玻璃珠取10粒样品,在每粒样品上选4个不同区域进行测试,并计算每个区域的  $S_q$ 。3种2 mm玻璃珠的测试数据如图3所示,GB-2-A、GB-2-B和GB-2-C三种玻璃珠的  $S_q$  平均值 ( $S_{q,\text{avg}}$ ) 分别为64, 602, 1176 nm, 标准差  $\sigma$  分别为23, 180, 168 nm。

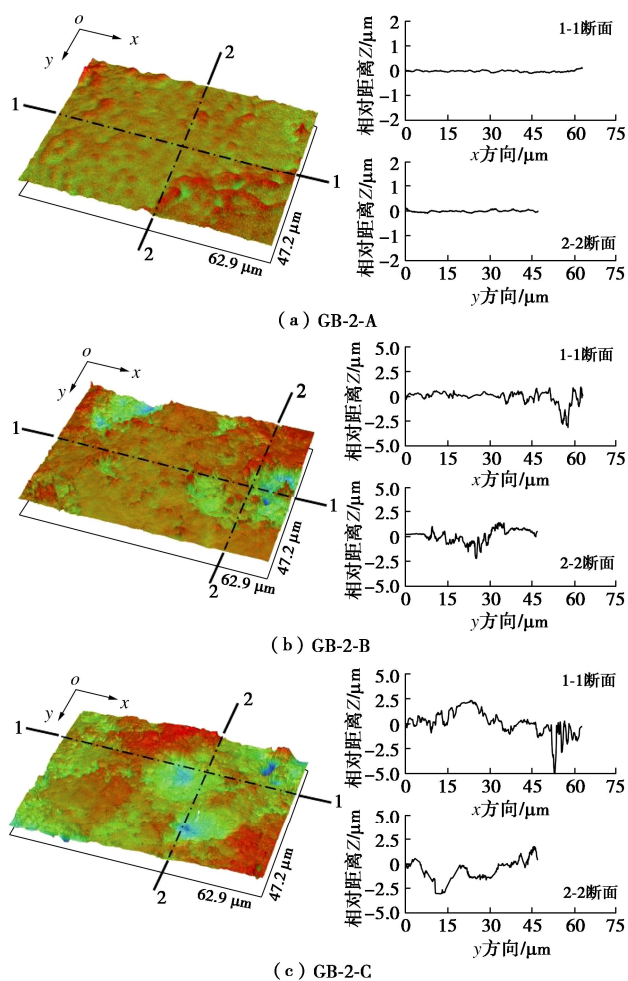


图2 3种玻璃珠表面纹理

Fig. 2 Surface textures of three types of glass beads

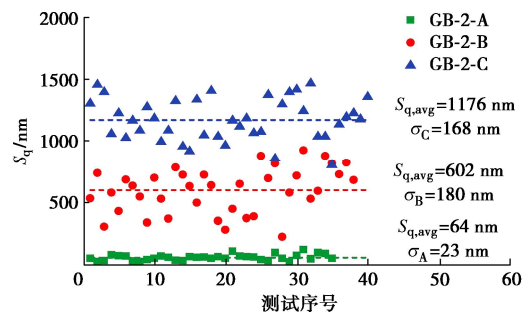


图3 3种玻璃珠的  $S_q$  测试结果

Fig. 3 Measured  $S_q$  for three types of glass beads

### 1.3 小应变剪切模量和阻尼比测试

本研究采用能量注入式虚拟质量(energy injecting virtual mass, EIVM)共振柱系统<sup>[11-12]</sup>(图4)测试玻璃珠试样的动力特性。试样的  $G_{\text{max}}$  与  $D_{\text{min}}$  均在剪应变  $\gamma < 7 \times 10^{-6}$  条件下取得。相较于其他常见的共振柱系统, EIVM 共振柱系统主要具有以下优势: ①EIVM 共振柱系统仅需10~20个振动周期即可达到稳定振动状态, 避免了通过扫频方式获得共振频率, 减少了前期振动对小应变动力特性测试的干扰; ②EIVM 共振柱系统施加扭矩使试样保持稳定的等幅值振动, 所测得的剪切模量和阻尼比有明确对应的剪应变, 避免了半功率带宽法或自由振动衰减法计算阻尼比时难以准确定义剪应变的缺点。

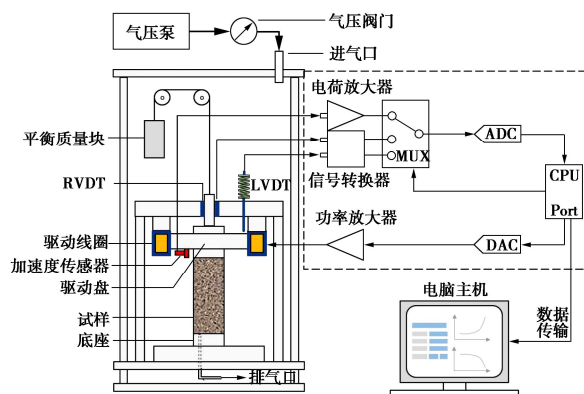


图4 能量注入式虚拟质量共振柱系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of energy injecting virtual mass resonant column system

试验采用直径38 mm、高度81 mm的圆柱体试样。将洗净风干的玻璃珠分3层用漏斗装入模具中。制样时, 采用不同长度的漏斗控制下落高度, 并保持漏斗管口略高于玻璃珠堆积物表面, 从而制得不同孔隙比( $e$ )的试样; 对于特别密实的试样, 可进一步利用橡皮锤敲击模具侧壁振实试样。完成制样后, 对试样施加30 kPa负压后拆除模具, 并测量试样高度及直径。逐级施加50, 100, 200, 400 kPa的有效应力, 通过LVDT 测量试样的高度变化, 待试样在当前有效应力

下的变形稳定后开展小应变动力特性测试。具体试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案  
Table 1 Test schemes

编号	初始孔隙比 $e_0$	有效应力/kPa
GB-2-A	0.620, 0.622, 0.637, 0.652	50, 100, 200, 400
GB-2-B	0.628, 0.631, 0.632, 0.633, 0.658, 0.662	50, 100, 200, 400
GB-2-C	0.637, 0.654, 0.660, 0.669	50, 100, 200, 400

2 试验结果与分析

2.1 小应变剪切模量  $G_{\max}$

不同粗糙度玻璃珠所成试样的  $G_{\max}$  与孔隙比的变化规律如图 5 所示。各有效应力条件下,  $G_{\max}$  随孔隙比的减小而增加; 相同孔隙比条件下,  $G_{\max}$  随有效应力增加而增加。值得注意的是, 采用相同方法所制得试样的孔隙比范围随颗粒粗糙度增加而向右侧移动(向孔隙比增加侧移动), 这与 Otsubo 等<sup>[10]</sup>观察到的孔隙比范围随粗糙度的变化趋势一致。

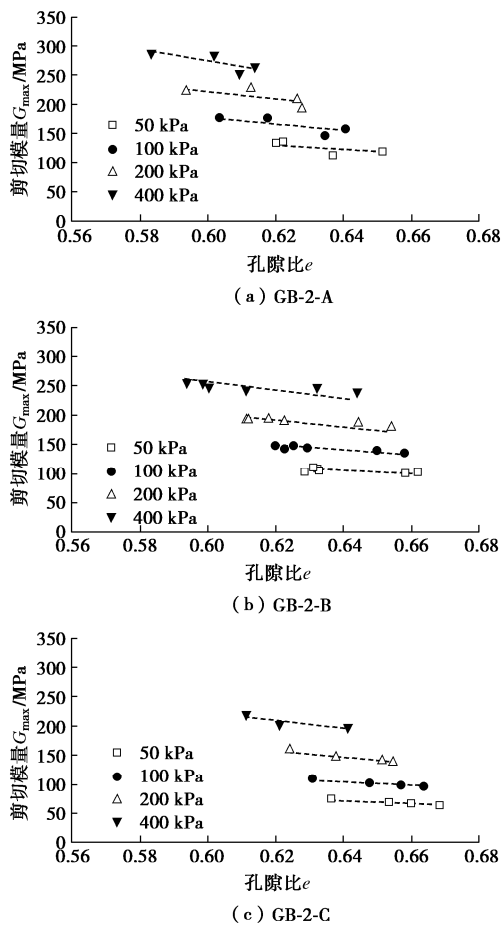


图 5 孔隙比与有效应力对  $G_{\max}$  影响

Fig. 5 Effects of void ratio and effective stress on  $G_{\max}$

图 6 (a), (b) 分别对比有效应力为 50, 400 kPa

条件下 3 种玻璃珠试样的  $G_{\max}$ - $e$  数据。当有效应力相同时,  $G_{\max}$ - $e$  关系随颗粒表面粗糙度增大而向下移动, 表明其他条件相同时, 颗粒表面粗糙度增加导致试样的  $G_{\max}$  减小。Santamarina 等<sup>[8]</sup>也观察到  $G_{\max}$  随粗糙度增大而减小的规律, 并认为颗粒间接触刚度随粗糙度增大而减小是产生上述现象的主要原因。

本文采用以下公式表征有效应力和孔隙比对  $G_{\max}$  的影响:

$$G_{\max} = A \cdot f(e) \cdot (\sigma')^n \cdot p_a^{1-n} \quad (2)$$

式中:  $A$  为无量纲的拟合参数;  $f(e)$  为孔隙比函数;  $\sigma'$  为有效应力;  $p_a$  为标准大气压强。本文采用幂函数形式的孔隙比函数  $f(e) = e^{-d}$ , 拟合参数  $d$  取 1.935 可较好地拟合  $G_{\max}$  与  $e$  的关系。如图 7 所示, 3 种玻璃珠试样的  $G_{\max}/f(e)$  随有效应力增大而增加, 并且  $G_{\max}/f(e)$ - $\sigma'$  数据随颗粒表面粗糙度增大而向下移动。

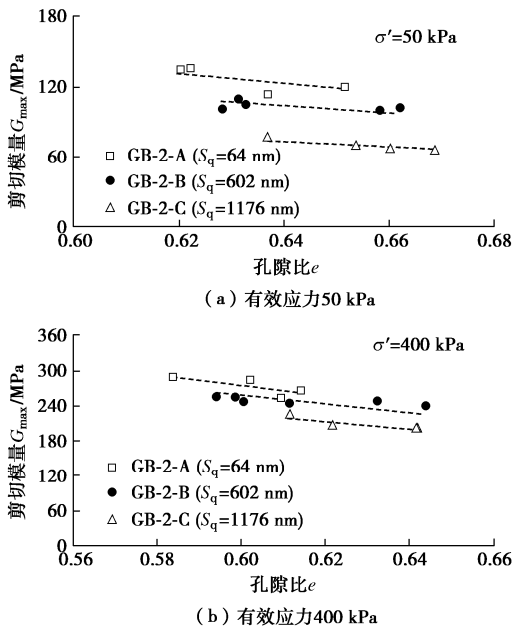


图 6 不同有效应力下粗糙度对  $G_{\max}$  影响

Fig. 6 Effects of roughness on  $G_{\max}$  under different effective confining pressures

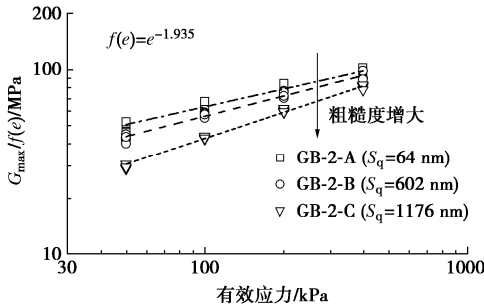


图 7 有效应力对 3 种表面粗糙度不同的颗粒材料  $G_{\max}$  的影响

Fig. 7 Effects of effective stress on  $G_{\max}$  of granular materials with different particle surface roughnesses

利用式 (2) 对试验数据进行拟合, 所得参数如表 2 所示。 $A$ ,  $n$  随  $S_q$  的变化如图 8 所示,  $A$  随  $S_q$  增大而减小, 具有相对较好的线性关系;  $n$  整体呈随  $S_q$  增大而增大的趋势, 具体表现为 3 种玻璃珠的  $G_{\max}/f(e)-\sigma'$  数据在所测试的有效应力范围内表现出随有效应力增加而逐渐一致的趋势, 这与 Sharifipour 等<sup>[9]</sup>和 Otsubo 等<sup>[10]</sup>试验的  $n$  随  $S_q$  的变化趋势基本一致, 表明  $G_{\max}$  对有效应力变化的敏感性增加。

表 2  $G_{\max}$  拟合参数

Table 2 Fitting parameters of  $G_{\max}$

颗粒类别	$d$	$A$	$n$	$R^2$
GB-2-A	1.935	609.28	0.370	0.971
GB-2-B		557.38	0.380	0.978
GB-2-C		420.88	0.486	0.995

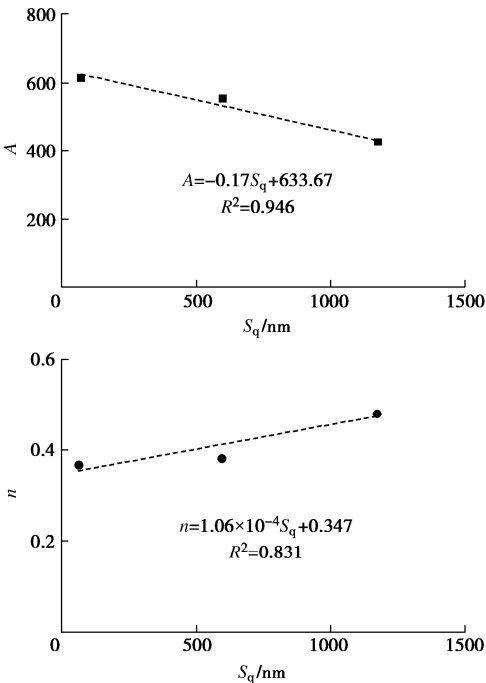


图 8  $S_q$  对拟合参数  $A$  和  $n$  的影响

Fig. 8 Effects of  $S_q$  on fitting parameters  $A$  and  $n$

2.2 小应变阻尼比  $D_{\min}$

小应变阻尼比  $D_{\min}$  与孔隙比的关系如图 9 所示。当有效应力相同时,  $D_{\min}$  随孔隙比变化在一定范围内波动, 无明显变化规律, 图 9 中虚线代表同一有效应力下不同孔隙比试样的  $D_{\min}$  平均值。其他学者也未观察到  $D_{\min}$  随  $e$  变化的明确规律<sup>[13]</sup>。将 3 种玻璃珠试样的  $D_{\min}$  随有效应力变化的规律呈现于图 10, 可以看出不同粗糙度的玻璃珠  $D_{\min}$  均随有效应力增加而减小。本文用以下公式表征有效应力对  $D_{\min}$  的影响<sup>[13]</sup>:

$$D_{\min} = D_1 \left( \frac{\sigma'}{p_a} \right)^{-\kappa} \quad (3)$$

式中:  $D_1$  和  $\kappa$  为拟合参数, 拟合结果见表 3。

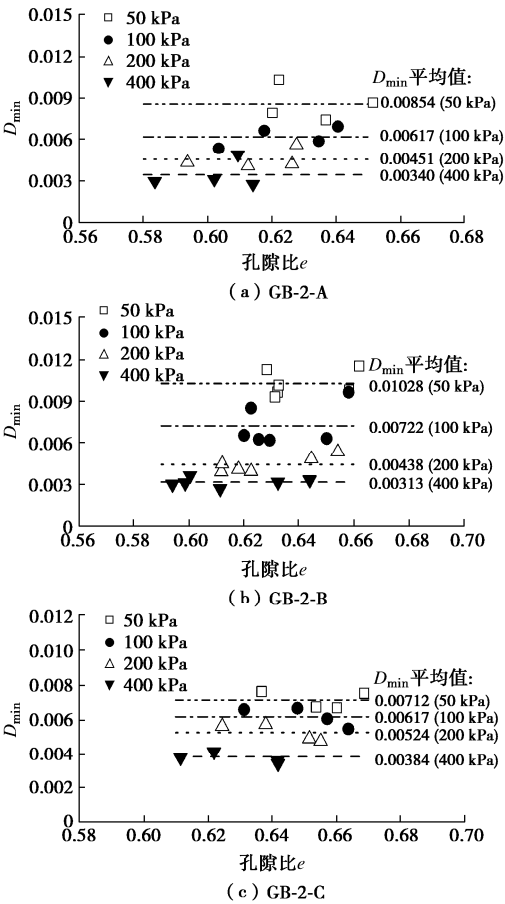


图 9 孔隙比对  $D_{\min}$  影响

Fig. 9 Effects of void ratio on  $D_{\min}$

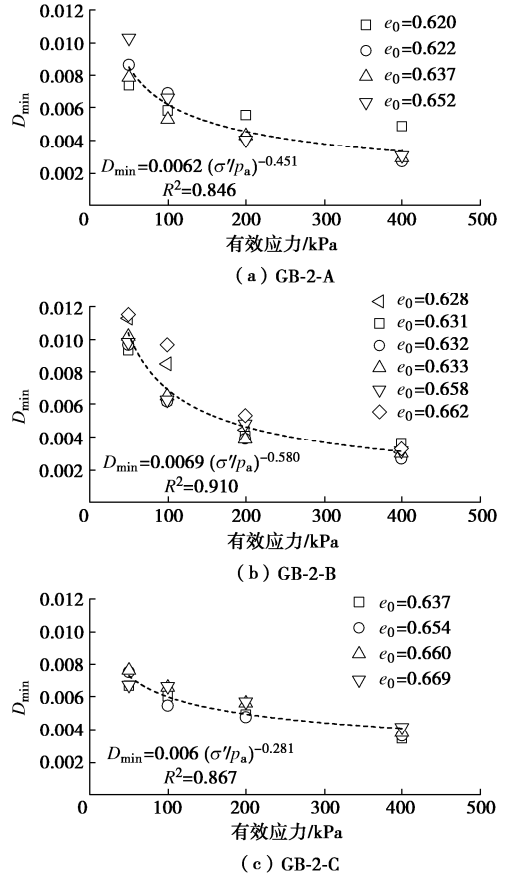


图 10 有效应力对  $D_{\min}$  影响

Fig. 10 Effect of effective stress on  $D_{\min}$



表 3  $D_{\min}$  拟合参数表

Table 3 Fitting parameters of  $D_{\min}$

颗粒类别	$D_1$	$\kappa$	$R^2$
GB-2-A	0.0062	0.451	0.846
GB-2-B	0.0069	0.580	0.910
GB-2-C	0.0060	0.281	0.867

小应变阻尼比  $D_{\min}$  随颗粒表面粗糙度的变化见图 11。当颗粒表面粗糙度增加时,  $D_{\min}$  的平均值(虚线所示)既可能先增加后减小, 也可能先轻微降低而后增加, 并无统一规律。由于相同有效应力条件下的 3 种玻璃珠的  $D_{\min}$  变化较小, 因此可以忽略表面粗糙度对  $D_{\min}$  的影响。

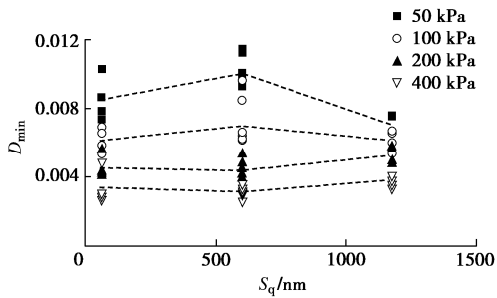


图 11 表面粗糙度对颗粒材料  $D_{\min}$  的影响

Fig. 11 Effects of surface roughness on  $D_{\min}$  of granular materials

3 讨 论

尽管有学者<sup>[7]</sup>认为颗粒表面粗糙度对土力学特性的影响不如颗粒形状显著, 但是当颗粒形状接近时, 颗粒表面粗糙度的影响则不应被忽视。合理考虑颗粒表面粗糙度的影响有助于揭示造成不同文献观点的原因。目前, 学者们关于土体颗粒粒径对  $G_{\max}$  或  $v_s$  的影响规律存在不同观点<sup>[14-15]</sup>, 特别是当一些学者利用形状规则、粒径单一的玻璃珠进行测试时, 仍发现  $G_{\max}$  或  $v_s$  随粒径的变化规律不同: Sharifipour 等<sup>[14]</sup>测试了粒径分别为 1, 2, 3 mm 的玻璃珠所成试样的剪切波速  $v_s$ , 发现在相近的孔隙比条件下  $v_s$  随粒径增加而增大; Patel 等<sup>[15]</sup>则发现玻璃珠试样的  $v_s$  随粒径增大而减小。

本研究在不同有效应力和孔隙比条件下测试了未经打磨的直径 1 mm 的玻璃珠 (GB-1-A) 所成试样的  $G_{\max}$ , 并采用三维干涉显微镜测得 GB-1-A 的粗糙系数  $S_q$  为 170 nm。在测试应力范围内 GB-1-A 的  $G_{\max}$  均小于 GB-2-A。为简便起见, 图 12 选取了 100, 200 kPa 两个有效应力下 GB-1-A 和 GB-2-A 试样的试验数据。如果忽略颗粒表面粗糙度的影响, 图 12 的结果是  $G_{\max}$  随颗粒粒径增大而增加的又一例证。实际上, 由于 GB-1-A 的粗糙系数 ( $S_q = 170$  nm) 明显大于 GB-2-A ( $S_q = 64$  nm), 因此图 12 中的数据并未排除表面粗糙

度的影响。Otsubo 等<sup>[10]</sup>提出采用  $S_q/R$  (其中  $R$  为颗粒半径) 表征表面粗糙度对  $G_{\max}$  的影响。图 13 是不同有效应力下 3 种 2 mm 玻璃珠试样与 GB-1-A 的  $G_{\max}/f(e)$  随  $S_q/R$  的变化规律。可以看出, GB-1-A 试样的  $G_{\max}/f(e)$  可以与 3 种 2 mm 玻璃珠的趋势线吻合。上述结果表明, 在其他条件相同的情况下, 研究粒径对  $G_{\max}$  的影响时, 需要将粗糙度这一因素考虑在内。因此, 当颗粒形状接近时, 充分考虑颗粒表面粗糙度的影响或将有助于合理揭示颗粒粒径对试样  $G_{\max}$  的影响规律。

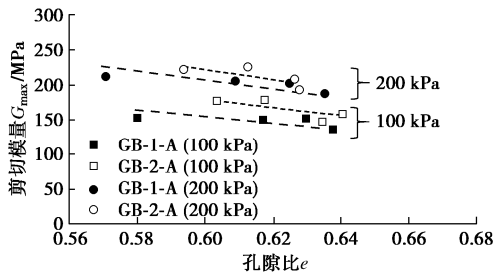


图 12 未打磨的不同粒径玻璃珠试样的  $G_{\max}$

Fig. 12  $G_{\max}$  of original glass beads with different sizes

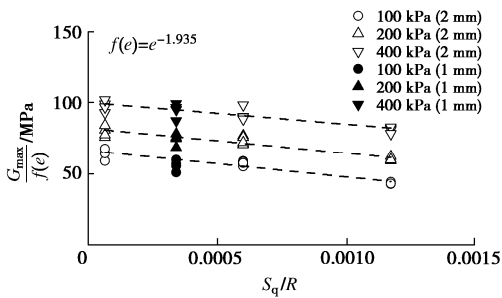


图 13  $G_{\max}/f(e)$  随  $S_q/R$  变化规律

Fig. 13 Variation of  $G_{\max}/f(e)$  with  $S_q/R$

对于天然砂土, 已有较多研究揭示了颗粒粒径和级配对  $G_{\max}$  的影响<sup>[2, 4]</sup>; 近年来, 也有一些学者量化表征了颗粒形状对  $G_{\max}$  的影响规律<sup>[3, 5]</sup>。但是, 目前文献中关于天然砂土的颗粒表面粗糙度如何影响天然砂土  $G_{\max}$  的研究较少。本文汇总了文献中 3 种天然砂土的  $G_{\max}$  测试结果与本文的玻璃珠材料对比, 并整理了它们的颗粒表面粗糙度、颗粒形状以及颗粒级配等信息 (表 4)。其中, 颗粒形状采用颗粒综合规则度 OR 表征, 且 OR 可以利用 Sympatec 公司生产的 QICPIC 动态颗粒图像分析仪得到<sup>[3, 7]</sup>, 并有文献利用 OR 表征颗粒形状对  $G_{\max}$  的影响<sup>[3, 5]</sup>。对于表 4 中的 5 种材料, 本文采用  $G_{\max}/e^{-1.935}/(1.2-OR)$  作为考虑孔隙比与颗粒形状的归一化剪切模量。Wichtmann 等<sup>[2]</sup>发现当不均匀系数  $C_u < 1.48$  时,  $C_u$  对  $G_{\max}$  影响在 10% 以内, 而表 4 中的 5 种材料  $C_u$  均不超过 1.48, 因此忽略  $C_u$  影响。如图 14 所示, 归一化剪切模量  $G_{\max}/$

$e^{-1.935}/(1.2-OR)$ 随  $S_q$  增加而减小, 表明天然砂土的  $G_{max}$  也受到表面粗糙度的影响, 且规律与本文采用的玻璃珠材料相似。图 14 的结果还表明  $G_{max}$  随粒径变化的规律不明显。

表 4 颗粒材料相关信息<sup>[7, 16-19]</sup>

Table 4 Information of granular materials <sup>[7, 16-19]</sup>				
颗粒名称	$S_q/nm$	OR	$C_u$	$d_{50}/mm$
Leighton Buzzard 砂	300	0.87	1.45	0.84
Hostun 砂	1972	0.84	1.48	0.34
丰浦砂	1847	0.85	1.39	0.216
2 mm 玻璃珠	64, 602, 1176	0.960	1.02	2
1 mm 玻璃珠	170	0.955	1.06	1

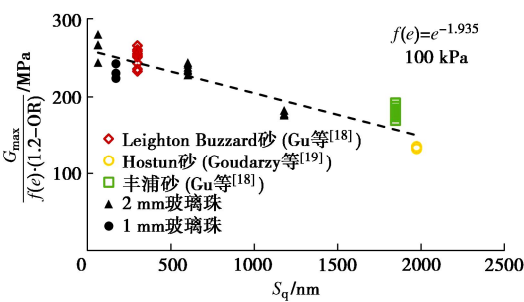


图 14 天然砂粒与玻璃珠  $G_{max}$

Fig. 14  $G_{max}$  of natural sand particles and glass beads

4 结 论

本文采用能量注入式虚拟质量共振柱系统测试了颗粒表面粗糙度不同的玻璃珠试样的  $G_{max}$  与  $D_{min}$ , 通过三维干涉显微镜测量了玻璃珠表面的均方根粗糙系数  $S_q$ , 揭示了试样  $G_{max}$  与  $D_{min}$  随颗粒表面粗糙度的变化规律。

(1) 所有受测玻璃珠所成试样的  $G_{max}$  随有效应力增大而增大, 随孔隙比增大而减小;  $D_{min}$  随有效应力增大而减小, 随孔隙比的变化规律不明显。

(2) 当孔隙比和有效应力相同时,  $G_{max}$  随颗粒表面  $S_q$  增大而减小,  $D_{min}$  受颗粒表面  $S_q$  影响不明显。

(3)  $G_{max}$  随孔隙比和有效应力变化规律的拟合参数  $A$  和  $n$  为颗粒表面均方根粗糙系数的函数。

(4) 当其他颗粒特征接近时, 颗粒的表面粗糙度对土体动力特性的影响不应被忽视。

参考文献:

[1] 杨文保, 吴 琪, 陈国兴. 长江入海口原状土动剪切模量预测方法探究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(10): 3889-3896. (YANG Wenbao, WU Qi, CHEN Guoxing. Dynamic shear modulus prediction method of undisturbed soil in the estuary of the Yangtze River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(10): 3889-3896. (in Chinese))

[2] 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.

[3] LIU X, YANG J. Shear wave velocity in sand: effect of grain shape[J]. Géotechnique, 2018, **68**(8): 742-748.

[4] SARKAR D, GOUDARZY M, WICHTMANN T. Influence of particle size on the small-strain stiffness in granular soils: experimental observations and micromechanical interpretation[J]. Géotechnique, 2022, **19**(6): 545-554.

[5] 黄志鹏, 魏 骁, 潘 坤, 等. 颗粒特性对材料小应变动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(5): 889-897. (HUANG Zhipeng, WEI Xiao, PAN Kun, et al. Effects of particle characteristics on small-strain dynamic properties of granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(5): 889-897. (in Chinese))

[6] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.

[7] CAVARRETTA I. The Influence of Particle Characteristics on the Engineering Behaviour of Granular Materials[D]. London :Imperial College London, 2009.

[8] SANTAMARINA C, CASCANTE G. Effect of surface roughness on wave propagation parameters[J]. Géotechnique, 1998, **48**(1): 129-136.

[9] SHARIFIPOUR M, DANO C. Effect of grains roughness on waves velocities in granular packings[C]//1<sup>st</sup> Euro-Mediterranean Symposium in Advances on Geomaterials and Structures. Hammamet, 2006.

[10] OTSUBO M, O’SULLIVAN C. Experimental and DEM assessment of the stress-dependency of surface roughness effects on shear modulus[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(3): 602-614.

[11] 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.

[12] 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 Zhengyin, LI Xiangsong. Effects of material state on the small strain behavior of dry sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(1): 10-14. (in Chinese))

[13] MENQ F Y, STOKOE K H. Linear dynamic properties of sandy and gravelly soils from large-scale resonant tests[C]// Deformation Characteristics of Geomaterials. IS Lyon, 2003.

[14] SHARIFIPOUR M, DANO C, HICHER P. Wave velocities in

- assemblies of glass beads using bender-extender elements[C]// 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. Newark, 2004.
- [15] PATEL A, BARTAKE P P, SINGH D N. An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, **32**(1): 1-10.
- [16] ALSHIBLI, KHALID A, et al. Quantifying morphology of sands using 3D imaging. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, **27**(10): 04014275.
- [17] ALTUHAFI F, O'SULLIVAN C, CAVARRETTA I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(8): 1290-1307.
- [18] 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.
- [19] GOUDARZY M, KÖNIG D, SCHANZ T. Interpretation of small and intermediate strain characteristics of Hostun sand for various stress states[J]. *Soils and Foundations*, 2018, **58**(6): 1526-1537.
- 
- (上接 1767 页)
- [3] 王成华, 鹿 群, 孙 鹏. 基坑抗隆起稳定分析的临界宽度法[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(3): 295-300. (WANG Chenghua, LU Qun, SUN Peng. Critical width method for analyzing stability of foundation pits against basal heave failure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(3): 295-300. (in Chinese))
- [4] FREDLUND D C, MORGENSTEM N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, **15**(3): 313-321.
- [5] ZHANG C G, CHEN X D, FAN W. Overturning stability of a rigid retaining wall for foundation pits in unsaturated soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, **16**(4): 06015013.
- [6] OH W T, VANAPALLI S K. Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach[J]. *Soils and Foundations*, 2018, **58**(2): 382-397.
- [7] 张常光, 晏 青, 周 菲, 等. 不同吸力分布下条形地基极限承载力解答[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(5): 1237-1251. (ZHANG Changguang, YAN Qing, ZHOU Fei, et al. Formulas of ultimate bearing capacity for strip foundation on unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(5): 1237-1251. (in Chinese))
- [8] 邓 波, 杨明辉, 王东星, 等. 刚性挡墙后非饱和土破坏模式及主动土压力计算[J]. *岩土力学*, 2022, **43**(9): 2371-2382. (DENG Bo, YANG Minghui, WANG Dongxing, et al. Failure mode and active earth pressure calculation of unsaturated soil behind rigid retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, **43**(9): 2371-2382. (in Chinese))
- [9] ZHANG J H, LING T, RAO Y Q, et al. Limit analysis of basal heave stability in unsaturated soils based on the unified strength theory[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, **39**(1): 593-602.
- [10] 赵锡宏, 陈志明, 胡中雄. 高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. (ZHAO Xihong, CHEN Zhiming, HU Zhongxiong. Practice and Analysis of Deep Foundation Pit Support Engineering of High-Rise Building[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996. (in Chinese))