

砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析

刘清秉¹, 项 伟¹, M. Budhu², 崔德山¹

(1. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics,
University of Arizona, Tucson, 85721, USA)

摘 要: 砂作为一种特殊的散体材料, 其宏观物理力学性质, 如密度、剪切特性(临界状态角, 剪胀角)、压缩性及颗粒破碎特征等均受到颗粒形状的影响, 目前为止, 对于砂粒土颗粒形状的量化工作, 未到达成熟阶段。试验采用普通光学显微镜获取 3 种不同砂颗粒及一种相似材料(玻璃球)数字图像, 利用 ImageJ 图形软件对其进行黑白二值化处理, 获取颗粒形状轮廓边界; 从 3 个层次定义颗粒形状参数, 并利用 java 语言编制形状量化插件程序, 计算砂粒各形状参数值, 最后通过相对密度试验、直剪试验测试不同砂样的极限孔隙比、剪切强度指标。试验结果表明: 整体轮廓系数、球形度、棱角度 3 项形状参数可作为不同砂粒形状鉴别和量化的关键参数, 且与剪胀角、临界状态摩擦角均具有良好的相关性, 试验提供了一种量化砂颗粒形状的有效方法, 并可得到的关键量化参数应用到宏观力学性质分析与数值模拟工作中。

关 键 词: 砂粒; 颗粒形状; 数字图像处理; 形状参数; 剪胀角

中图分类号: TD 853.34

文献标识码: A

Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand

LIU Qing-bing¹, XIANG Wei¹, M. Budhu², CUI De-shan¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tucson 85721, USA)

Abstract: As a special granular material, the mechanical properties and characteristics of sand are significantly affected by particle shape such as packing density, shearing characterization, compaction, and crushability. However, grain shape quantification techniques to distinguish one sandy material from another have not reached a stage of development for inclusion in the interpretation of the behavior of sand. In this paper, the light microscope was employed to capture the grain shape digital images, which were subsequently converted into binary picture to produce contour boundary for particle shape with the help of ImageJ. The Java program language was used to compile a new plugin to determine several grain shape parameters of all sand samples in our test. Finally, relative density and direct shear tests were conducted to determine the limit void ratios and shearing strength index. It is concluded that the overall outline coefficient, sphericity, angularity could be taken as the key shape parameters to distinguish grains; and these key parameters are related closely with the angle of dilation and critical state angle as well. The proposed method can be used as an effective means to accomplish the sand particle shape quantification; and the key shape parameters can also be applied to the mechanical properties analysis and the related numerical simulation work.

Key words: sand; particle shape; digital image processing; shape parameters; dilation angle

1 引 言

土颗粒形状与土体母岩成分、风化作用、搬运沉积的环境条件有着密切的关系。对于无黏性土来说, 颗粒尺寸大小、颗粒级配及颗粒形状是 3 个极其重要的属性参数, 针对前两项属性对砂土力学及变形特性的影响机制研究, 国内外可见大量报道。

但针对砂颗粒形状与宏观物理力学性质相互作用的研究, 却并不多见, 有学者尝试采用数值方法模拟不同形状的散体材料颗粒对于其力学性质的影响^[1-2], 也只是局限对于颗粒形状的笼统地表述层次, 如“规则较圆的颗粒”, “不规则形状颗粒”等, 此外, 目前常规的岩土工程设计和计算中, 能将土颗粒的形状因素考虑在内的模型和公式亦非常罕

见。造成以上种种情况的主要原因在于缺乏一种既标准又简便高效地量化砂土颗粒形状的手段。国外很多学者之前注意到颗粒形状的重要性，并展开了一系列的研究工作^[3-6]，提出了很多种量化方法，如傅里叶描述法，分形理论方法等，但颗粒形状量化的发展目前仍不够成熟，其难点在于：①颗粒个体形态描述；②群体形状分布特征描述；③群体形态描述。在本文的研究中，以 3 种形状差异明显的石英砂为研究对象，采用常规的光学显微镜获取颗粒数字图像，通过编写形状分析插件完成形状参数量化，并基于试验结果对上述几项难点问题进行分析，通过常规的力学试验，探讨颗粒形状因素对于堆积密度、剪切特性、压缩性等力学指标的影响作用。

2 试验材料

4 种不同的散粒材料用于本次分析，分别为 3 种“中~粗”石英砂及一种商用的玻璃材料，选择玻璃颗粒的原因在于其主要物质组成（ SiO_2 、 Al_2O_3 ）与砂相同，可以较好地用于模拟砂粒。分别命名 4 种材料为 S1、S2、S3、GB(玻璃粒)，其中 GB 颗粒被特别加工成标准的球形颗粒，来检验颗粒形状参数量化结果的精确度，试验材料的基本性质见表 1。不均匀系数 $C_u = 1$ 表示样品所有颗粒为同一尺寸，通常 $C_u < 4$ 的土样定义为均粒土，属级配不良，为消除颗粒级配对于砂样力学性质的影响，本次测试的试样均经筛选为均粒试样， C_u 在 1~2 之间。

表 1 试验样品的基本性质
Table 1 Basic property of samples

材料	颗粒 相对密度 G_s	平均 粒径 d_{50}/mm	不均匀 系数 C_u	矿物组成
GB	2.50	0.12	1.03	$\text{SiO}_2 > 85\%$, $\text{CaO} + \text{MgO} > 5\%$, $\text{H}_2\text{O} < 1\%$
S1	2.65	0.15	1.95	$\text{SiO}_2 > 94\%$, 含少量铁铝氧化物及微量 CaCO_3
S2	2.65	0.45	1.42	
S3	2.68	0.90	1.29	

3 颗粒图像获取与处理

采用光学显微镜进行颗粒形状观察并获取图像，在观察前，需要对样品进行洗净、烘干，从而消除杂质对于观察结果造成的误差，另外，为获得更好的图像质量，提高图像中颗粒形貌的清晰度，观察时需将样品颗粒放在鲜明的对照背景之中，如在颗粒下铺放一层灰白色胶带。显微镜从不同角度投射同一个颗粒可能产生多种不同的断面轮廓，考虑到这种分散性，在数字图像获取中，本文中的颗

粒均采用显微镜倾斜 20° 进行拍摄。Bowman^[3]认为，显微镜一定角度的倾斜拍摄，可产生电子阴影并且使颗粒形貌呈现出具有一定纵深的清晰形态，从而得到更好的形状量化结果。几种试样的显微镜图像见图 1。

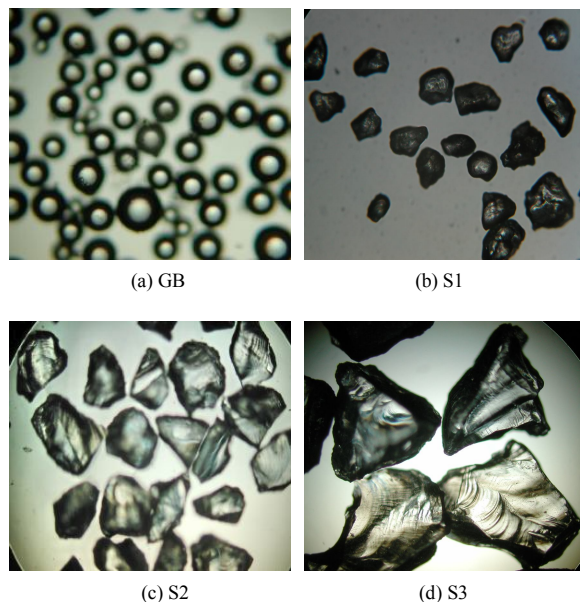


图 1 试样显微镜图像 (放大倍数 $\times 50$)
Fig.1 Microscope image of samples

为采用计算机程序对数字图像进行识别分析，需要将显微镜图像转化为黑白二值图像格式，并提取出颗粒形状的边界轮廓。

这里采用 ImageJ 图像处理软件进行二进制转化处理，该软件是一个基于 java 语言的公共图像处理软件，广泛应用于显微图像处理领域。作为一个开放结构的软件，通过内置的编辑器和编译器，ImageJ 能很好地支持用户自定义插件和宏，后面的分析中，基于 ImageJ 平台，编制形状描述插件用于颗粒形状参数的量化。以 S1 颗粒为例，图 2 为显微镜图像转化为黑白二值图像。

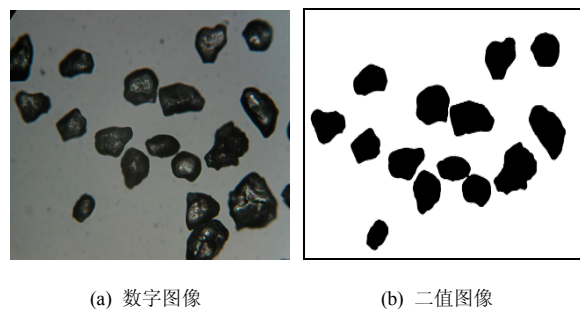


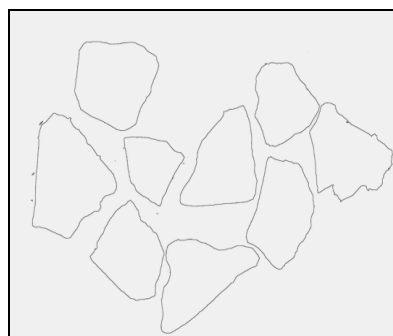
图 2 S1 数字图像及黑白二值图像
Fig.2 Digital and binary image of S1 sample

为了高质量地转化成二值轮廓图，方便计算机

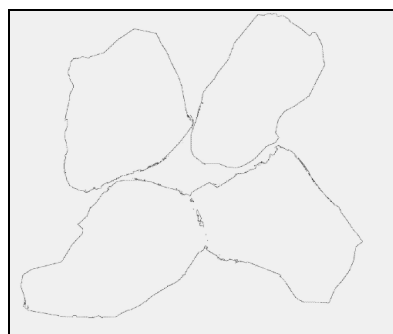
程序高效地识别颗粒形貌,需要对显微图像进行如下处理工作:①微调图像的明亮和对比度,对图片进行数字过滤,并修正背景颜色为全白,从而使得颗粒轮廓更加突出;②显微镜图像转换后的黑白图像中,颗粒内局部区域往往会呈现白色模糊带,需要将该区域修正为黑色,以防计算机误将其识别成背景的一部分;③剔除图片中不完整的颗粒,重叠在一起或相互紧密接触的几个颗粒需放大后进行边界分离,防止程序将其误识别成单个颗粒。图3为3种砂粒外形的二值边界轮廓图。



(a) S1



(b) S2



(c) S3

图3 3种砂粒外形边界轮廓(放大倍数×70)
Fig.3 Outline of particle boundary for sands

4 颗粒形状参数的定义和构建

4.1 颗粒尺寸参数

在准确获取了颗粒单元形状边界后,经 ImageJ 分析处理,可得到颗粒单元体的几何参数,如颗粒数量、面积、尺寸、周长等;其中颗粒尺寸包括长、

宽、费雷特直径(Feret)、等效面积圆直径等不同表示方法。上述几何参数可以从图像分析中直接得到,称之为基本尺寸参数,表2列出了各类基本尺寸参数及其描述^[7-8],图4给出相关参数示意。

表2 颗粒基本尺寸参数

Table 2 Basic dimension parameters of particles

参数	符号	描述
面积	A	颗粒边界范围内所有像素之和
周长	P	颗粒边界上连续像素的距离之和
Feret 直径	Fa	颗粒边界上外切平行线间距
长度	L	最大费雷特直径
宽度	B	最小费雷特直径
外接多边形面积	C_A	沿颗粒边界的最小外接多边形面积
外接多边形周长	P_C	沿颗粒边界的最小外接多边形周长
等效直径	D	与颗粒具有相同面积的圆直径
外接圆半径	R_c	颗粒最小外接圆半径
内切圆半径	R_i	颗粒最大内切圆半径

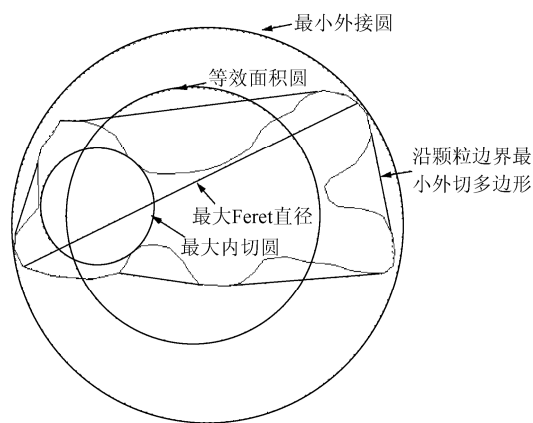


图4 不规则颗粒基本尺寸参数表征

Fig.4 Basic dimensions parameters of irregular particles

图像处理分析的砂颗粒长度和面积各参量均是以像素为单位的,而实际中常用到的则是 mm 和 mm^2 ,二者之间的转换是必要的。这里采用了一个简单的方法进行转化:每次显微镜拍照时,将一个标准球形的 GB 颗粒放置在背景中心,由于 GB 颗粒直径已知,为 0.12 mm,因此,砂颗粒长度和面积各分量就可以分别通过式(1)、(2)来计算标定

$$L_m = 0.12 L_p / L_{\text{Ferret}} \quad (1)$$

$$A_m = \frac{\pi \cdot 0.12^2}{4} \frac{A_p}{A_{\text{GB}}} \quad (2)$$

式中: L_m 是以 mm 为单位的长度变量; A_m 是以 mm^2 为单位的面积变量; L_p 为以像素为单位的长度变量; A_p 是以像素为单位的面积变量; L_{Ferret} 是图像识别计算的 GB 颗粒的平均费雷特直径(以像素为单位); A_{GB} 是图像识别的 GB 颗粒面积(以像素为单

位)。

4.2 表征颗粒形状参数的构建

一个不规则颗粒的形状(形态)可以从以下 3 个层次加以描述:第 1 个层次为轮廓全局面貌,通常的简化表述如球状、方形、板状、柱状等;第 2 层次为磨圆程度或棱角度,该类描述在第 1 层次的基础上,更加细化了外形,重点在于描述颗粒表面棱角的突出度或磨圆程度;第 3 层次为表面微纹理结构,该类型的描述更加精细,反映了颗粒表面粗糙度、不规则性以及边界曲线变化起伏的复杂程度等。为了能准确描述上述 3 个层次的形状要素,完成形状的量化,就需要组合不同的基本尺寸参数变量,来定义不同的形状参数变量。构建形状参数变量的基本原则是:选择最恰当的尺寸参数,通过尽可能简单的组合计算方式,最大程度地表征颗粒形状的含义,且定义的形状参数能够密切联系试样的本身物理性质。

鉴于此并参考相关研究结果^[7-9],本次试验构建的颗粒形状参数如下:第 1 层次形状参数量包括整体轮廓系数 $\alpha = \pi D/P$,扁平度 $e = L/B$,球形度 $s = R_i/R_c$;第 2 层次形状参数量包括棱角度 $A_g = P_C/P_E$;第 3 层次形状参数量包括粗糙度 $r = (P/P_C)^2$

其中,整体轮廓系数定义为等效面积圆周长与颗粒自身周长比,对于标准的圆形颗粒,取最大值 1,在面积一定的情况下,整体形状越偏离圆形,包含突出棱角且粗糙起伏越大的颗粒,其自身周长就越大,该值越小,因此,该参数可从整体上描述颗粒的形貌特征。扁平度表征颗粒的伸长属性,颗粒

整体上越接近正方形或球形,该值越接近 1,反之,颗粒外形越扁平、狭长,取值越大。球形度反映了颗粒 3 个主要尺寸接近标准球形的程度。棱角度定义为颗粒最小外接多边形周长 P_C 与等效椭圆的周长 P_E 之比(等效椭圆指与颗粒具有相同面积和扁平度的标准椭圆形),颗粒最小外接多边形周长表征颗粒在排除了表面粗糙度和边界曲线微小起伏影响下的近似边界周长,而等效椭圆则排除了颗粒扁平度及整体外形相似程度的影响,即棱角度是排除了第 1 和第 3 层次外形干扰后,特别用于表示颗粒表面棱角数目及突出程度的参数。粗糙度指标定义基于文献[10]。以上形状参数中,整体轮廓系数、棱角度参数构建公式为本文首次提出的。

5 颗粒形状量化结果分析

5.1 插件量化结果的精确度分析

ImageJ 图像处理软件本身提供了相关的插件用于颗粒形貌描述,其中插件 Shape Descriptor^[11]较广泛地应用于生物细胞的形状描述,该插件源代码公开,本次试验中,基于 Shape Descriptor 源代码,利用 java 语言,添加写入 4.2 节中定义构建的形状参数变量,通过 ImageJ 内置的编译器,生成用于本次分析的颗粒形状量化插件包,对于不同砂粒的二值图像进行分析,生成所有颗粒单元体的形状参数值。

为检验该插件量化形状参数结果的精确度,利用其分析一个半径为 100 个像素的标准二维圆以及经过二值化处理的玻璃球 GB 图像,获取其形状参数结果并与理论值进行比较。结果见表 3。

表 3 标准圆及 GB 量化结果
Table 3 Quantification of standard circle and GB

材料	试验量化结果					理论值				
	整体轮廓系数	扁平度	球形度	棱角度	粗糙度	整体轮廓系数	扁平度	球形度	棱角度	粗糙度
标准圆	0.933	1	1.000	0.998	1.000	1	1	1	1	1
GB	0.910	1	0.982	1.104	0.984	1	1	1	1	1

由表 3 可见,对于标准圆和 GB 颗粒,插件获取的试验值均接近理论值,其中整体轮廓系数和棱角度 2 项,偏差值较大,约为 7%~10%,其余各项偏差均不超过 2%,证明了本试验使用插件分析形状参数结果具有很好的可信度。此外,GB 的总体偏差程度大于标准圆,原因在于 GB 颗粒数字图像处理及转换过程存在误差,导致其用于分析的二值轮廓边界并非是完美标准圆。

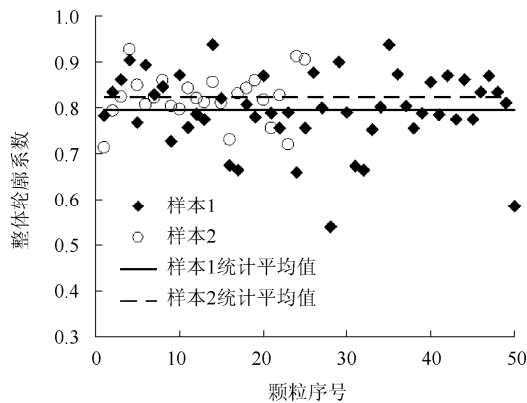
5.2 样本大小对颗粒形状量化结果的影响

每一种砂样均由数目庞大的颗粒组成,要对其进行颗粒形状量化,往往要涉及一个抽取样本的大小确定问题,即选取多少数目的颗粒单元组成一个样本来代表该种砂。

通常情况下,样本大小的确定取决于试样整体颗粒粒径的分布情况,即级配越好,组成代表性样本颗粒数目就要越多。考虑到本次试验的砂为均粒

($1 < C_u < 2$), 针对 S1 号砂, 采用两种样本进行量化比较分析, 样本 1 由随机选取的 50 个颗粒组成, 样本 2 由随机选取的 25 个颗粒组成。针对 S2 号砂, 也采用两种样本进行分析, 样本 1 由随机选取的 60 个颗粒组成, 样本 2 由抽取的 30 个颗粒组成。

图 5、6 分别为两种砂样各样本的颗粒形状量化结果比较。图 6 中气泡的中心为形状参数平均值, 气泡大小代表标准偏差大小, 横坐标中, 1 代表整体轮廓系数; 2 代表扁平度; 3 代表球形度; 4 代表棱角角度; 5 代表粗糙度。



注: 两条直线表示各样本的统计平均值。

图 5 S1 两种样本整体轮廓系数量化结果
Fig.5 Quantification of two samples of S1

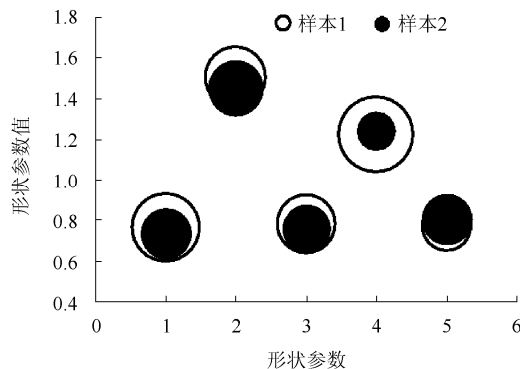


图 6 S2 两种样本不同颗粒形状参数比较结果
Fig.6 Comparison of results of two samples of S2

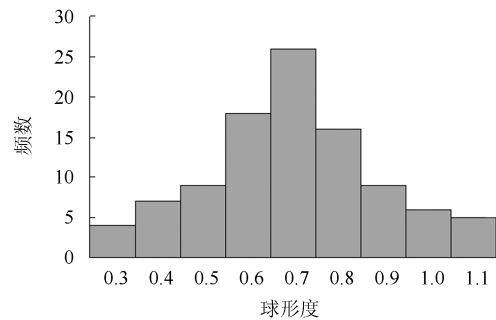
对于 S1, 样本 1 的 50 个颗粒整体轮廓系数的平均值为 0.792, 标准偏差值为 0.075, 样本 2 的 25 个颗粒整体轮廓系数的平均值为 0.82, 标准偏差为 0.053。两个样本的平均值之差为 0.028, 落在每个样本的标准偏差的范围。图 6 表明, 对于 S2, 两种样本的第 3 层次粗糙度指标的统计平均值和标准偏差几乎相等; 第 1 层次形状指标中, 整体轮廓系数、扁平度及球形度差异略为明显, 但差值均在两者的标准误差范围内; 第 2 层次的棱角角度参数差别最大, 反映了群体中各颗粒单元磨圆程度差异较大, 也显

示出该参数敏感度高。

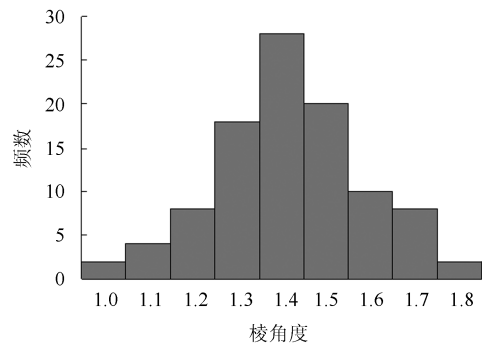
整体来看, 对于两种砂样 (S1 和 S2), 都存在如下趋势: ①小样本 (颗粒数为 25、30) 数据分散度较之大样本 (颗粒数为 50、60) 要小, 即标准偏差值小; ②小样本的量化结果平均值接近于大样本, 一定程度上可反映砂样的整体形状特征。在精度要求不严格的情况下, 可随机选取 25 个颗粒组成代表性样品来初步判定砂样整体的形状平均值。

5.3 群体分布特征及关键形状参数的确定

显然, 仅仅选取每种材料的 25 个颗粒组成的小样本, 虽可初步判定但尚不能精确反映每种砂样各形状参数的整体分布特征。基于此, 分别随机抽取每一种砂样 100 个颗粒, 组成更大的样本进行颗粒图像分析, 并采用分析插件完成形状参数量化。统计每种试样 100 个颗粒结果表明, 各项形状参数基本上均呈近似正态分布。以 S2 砂样球形度、棱角角度为例, 如图 7 所示。



(a) 球形度分布



(b) 棱角度分布

图 7 S2 砂球形度及棱角角度参数分布特征
Fig.7 Distribution for sphericity and angularity of S2 sand

图 7 的正态分布特征表明, 若取各形状参数分布曲线的期望值来代表该指标砂样整体值, 具有较好的可信度。另外, 比较图 6、7 可以看出, 25 个颗粒组成的小样本的统计平均值, 较接近 100 个颗粒的正态分布的期望值, 球形度分别为 0.758、0.7, 棱角角度分别为 1.24、1.4, 在一定程度上验证了 5.2 节的结论。

取每种砂样 100 个颗粒各形状参数分布期望值作为砂样最终形状参数值, 结果见图 8。3 种砂样中, S1 整体轮廓系数值、球形度值最大, 棱角度值最小, 表明 S1 砂颗粒整体外形轮廓最接近圆球形, 磨圆程度最高, 而 S3 砂颗粒形状偏离圆球形程度最高, 扁平度大, 更接近于方条形, 且颗粒多突出棱角。S2 形态介于 S1 与 S3 之间, 特征趋向于椭球与方形的中间状态, 且边界曲线起伏较小, 表面较光滑(扁平度较大, 棱角度和粗糙度小)。

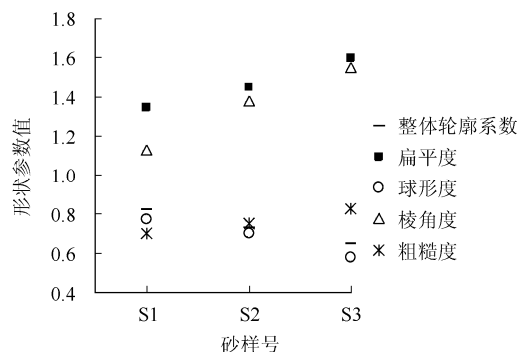


图 8 3 种砂样的形状量化结果

Fig.8 Quantitative results for particle shape of the three sands

整体统计本次试验所有砂样的每一项形状参数见图 9, 其中横坐标数值代表的参数同图 6, 误差线中心点表示每项指标的平均值, 误差线长短代表标准偏差量。可以看出, 整体轮廓系数、球形度、棱角度 3 项误差线长, 数值变化幅度大, 其余 2 项变化则不明显。表明, 对于不同的砂样, 整体轮廓系数、球形度、棱角度 3 项指标数值差异较大, 灵敏度高, 可将该 3 种参数作为量化的关键性指标来鉴别区分不同砂样的颗粒形状。

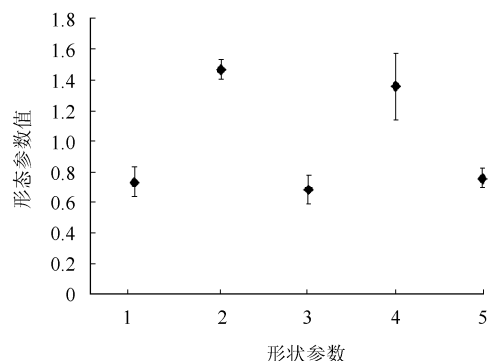


图 9 不同形状参数统计比较

Fig.9 Statistical comparison of different shape parameters

6 颗粒形状与砂力学指标相关性分析

6.1 颗粒形状对于砂堆积状态的影响

分别称取每种材料约 1 kg 装填于试样筒中, 放

在振动台上, 加上套筒, 并依次在表面上施加盖板和 5 kg 重物, 调节振动台频率为 60~80 Hz, 振动约 20 min, 以获取土样的堆积最密实状态, 计算最小孔隙比 $e_{\min}$ 。最大孔隙比试验采用旋转量筒法, 即将一定质量的土样, 通过漏斗缓慢倒入量筒, 且整个倾倒过程, 保持自由下落高度在 2~5 mm 之间。之后上下翻转量筒, 并记录整个过程中土样出现的最大堆积体积值, 以计算最大孔隙比 $e_{\max}$, 结果见表 4 及图 10。

表 4 4 种材料的形状参数及极限空隙比
Table 4 Limit void ratio of four materials

土样	整体轮廓系数	球形度	棱角度	最大孔隙比	最小孔隙比
GB	1.00	1.00	1.00	0.754	0.511
S1	0.82	0.77	1.13	0.807	0.515
S2	0.73	0.70	1.38	1.011	0.636
S3	0.65	0.58	1.56	1.076	0.670

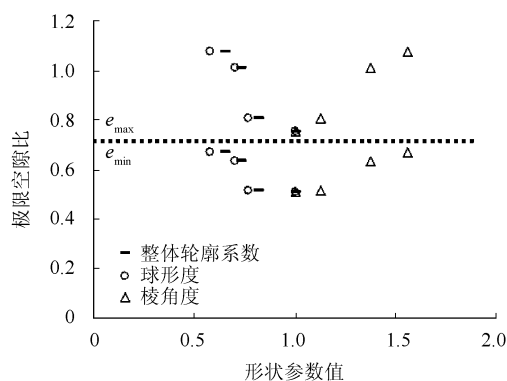


图 10 极限孔隙比随颗粒形状参数的变化关系

Fig.10 Variation of limit ratio with particle shape parameter

本次试验采用的材料为均粒, 颗粒级配对于极限孔隙比的影响已经消除, 因此, 主要的差异由材料颗粒的形状所控制。图 10 中虚线为最大、最小孔隙比数据分界线, 可以看出, $e_{\max}$ 和 $e_{\min}$ 随土颗粒整体轮廓系数和球形度的增大而减小, 随棱角度的增大而增大, 球形光滑的 GB 样, 极限孔隙比值最小。在堆积时, 突出棱角倾向于将邻近的颗粒相互隔离开, 且形状越偏离球状、整体越细长的颗粒, 容易在相邻的颗粒间搭接起较大的孔隙, 即造成极限孔隙比随着土颗粒的形状不同而呈现显著的差别。

6.2 直接剪切试验

根据极限孔隙比测试结果, 分别将 4 种材料控制在相对密度 $D_r = 0.8$ 的密实状态, 并于垂直压力 $\sigma' = 100$ kPa 下进行直剪试验, 剪切盒周围注入清

水, 静置 20 min, 完成试件饱和, 剪切速率控制在 0.5 mm/min, 从而保证整个剪切过程中试件处于排水状态。当试件出现峰值剪切力之后, 仍继续剪切至水平剪切位移 $H = 10$ mm, 并取大剪切位移附近, 应力-应变关系曲线中剪应力保持常数时的内摩擦角为临界状态角 (稳定状态角)。典型的剪切曲线见图 11。

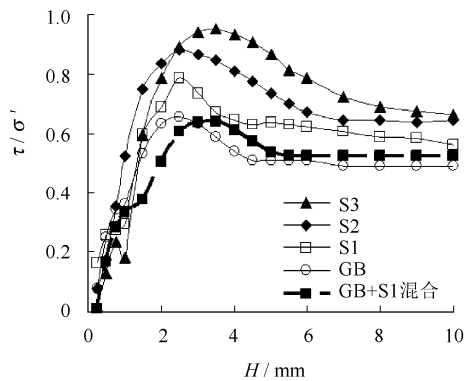
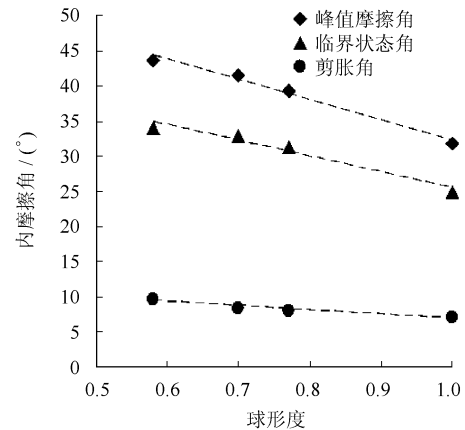


图 11 各试验材料的剪切位移-应力比曲线
Fig.11 Typical shearing curves of materials investigated

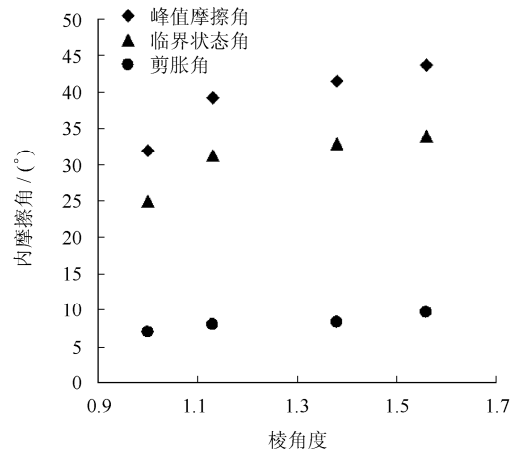
分别取图 11 中曲线的峰值及临界稳定状态点计算各试样的峰值内摩擦角和临界状态角, 并取两者的差值估算剪胀角的大小。由于各试件的初始状态 (相对密度、垂直压力) 控制在同一状态下, 且均为均粒土, 矿物组成亦相同, 因此, 剪切强度指标的差异的原因存在于砂颗粒的形状因素, 见图 12。可以看出, 内摩擦角均随着颗粒球形度的增加而减小, 随棱角程度值增加而增大, 且与球形度参数呈拟合度很高的线性递减关系, 随棱角程度初始增大变化较明显, 之后渐趋于较平稳的状态。

Bolton^[12]指出, 砂土的峰值破坏摩擦角主要由剪胀角和临界状态角两部分组成, 其中剪胀角大小主要受土样初始状态影响 (孔隙比、围压); Rowe^[13]将砂粒土的剪切摩擦分为两个部分: 一是颗粒滑动, 产生滑动摩擦; 另一是颗粒与相邻的颗粒脱离“咬合”而移动, 产生咬合摩擦。对于颗粒均为球状的 GB 试件, 剪切过程主要以颗粒接触面的滑动或滚动为主, 且此时颗粒接触面间因粗糙不平而形成微细咬合作用, 并不产生明显的体积膨胀 (剪胀性)。对于球形度小、形状不规则、棱角度大的颗粒集合体 (S2、S3), 在密实状态下颗粒之间紧密嵌合连结, 剪切过程中除了颗粒间的相互滑动外, 相邻颗粒间由于相互嵌合, 必然要发生颗粒的竖起, 相互跨越才能移动, 即需破坏相互咬合作用, 而要克服这一作用的最小能力消耗方式就是通过剪切过程中体积

膨胀, 即剪胀而达到。因此, 对于球形度低、棱角度大的颗粒其剪胀摩擦角显然要高得多。



(a)



(b)

图 12 剪切摩擦角随颗粒形状参数变化关系
Fig.12 Friction angle varying with the particle shape

试验表明^[14], 砂土在大应变下的稳定状态角 (临界状态角) 随土样初始条件和试验条件变化很小, 可作为材料的固有属性。Cho^[15]指出, 其值仅受土颗粒本身的矿物成分和颗粒形状影响。经回归分析, 对于本次测试的几种石英砂, 可采用颗粒形状指标量化表示临界状态角 φ'_r 为

$$\begin{aligned}\varphi'_r &= 52 - 26.5\alpha \quad (R^2 = 0.9578) = \\ &48 - 22.5s \quad (R^2 = 0.9563) = \\ &13 + 14.2A_g \quad (R^2 = 0.8)\end{aligned}\quad (3)$$

式中: R^2 为拟合相关系数。

总体来看, 临界状态角和剪胀角共同构成了剪切破坏峰值摩擦角, 因此, 在工程应用中, 对于颗粒形状差异较大的砂土底层, 在土体强度指标选用及结构物-土相互作用力设计计算时, 土颗粒形状应作为一项不可忽视的重要指标加以考虑。

7 结 语

本文提供了一种基于数字图像技术以及计算机程序辅助, 进行砂粒土颗粒形状量化的有效方法。从颗粒形态的 3 个不同层面构建了几种形状描述参数, 试验结果表明, 整体轮廓系数、棱角度及球形体度 3 项指标, 具有很好的区分灵敏度, 可作为关键性参数来鉴别不同砂样形状特征, 并且三者与极限孔隙比、剪切摩擦角指标间具有良好的相关性。在进行工程实际的粗粒土、泥沙层细观机制模拟计算时, 可采用本文构建的几种形状量化参数, 大量统计颗粒单元, 得到较为真实反应材料单元的几何特征和结构网络, 为采用离散元计算提供良好的基础。

针对粒状土颗粒形状的量化及其对土体力学及变形影响机制的相关研究, 目前开展的较少, 由于砂粒形状描述和宏观力学变形表现均非常复杂, 本次试验只是基于对颗粒的二维形状特征作为初步探讨, 尚需在颗粒三维形状定量表征、关键颗粒形状参数选取、颗粒形状-颗粒破碎度-颗粒集合体剪切强度三者的数值量化关系以及微观机制分析上做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] TING J M, MEACHUM L R, ROWELL J D. Effect of particle shape on the strength and deformation mechanisms of ellipse-shaped granular assemblages[J]. **Engineering Computations**, 1995, 12(2): 99—108
- [2] ANTONY S J, KUHN M R. Influence of particle shape on granular contact signatures and shear strength: New insights from simulations[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2004, 41(21): 5863—5870.
- [3] BOWMAN E T, SOGA K, DRUMMOND W. Particle shape characterization using Fourier descriptor of analysis[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(6): 545—554.
- [4] EHRLICH R, WEINBERG B. An exact method for characterization of grain shape[J]. **Journal of Sedimentary Petrology**, 1970, 40(1), 205—212.
- [5] GORI U, MARI M. The correlation between the fractal dimension and internal friction angle of different granular materials[J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(6): 17—23.
- [6] HYSLIP J P, VALLEJO L E. Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials[J]. **Engineering Geology**, 1997, 48(3/4): 231—244.
- [7] MARK L H, NEIL W P. Selection of descriptors for particle shape characterization[J]. **Particle and Particle System Characterization**, 2003, 20(1): 25—38.
- [8] MORA C F, KWAN A K H. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing[J]. **Cement and Concrete Research**, 2000, 30(4): 351—358.
- [9] KWAN A K H, MORA C F, CHAN H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing[J]. **Cement and Concrete Research**, 1999, 29(9): 1403—1410.
- [10] WADELL H. Volume, shape and roundness of rock particles[J]. **Journal of Geology**, 1932, 40(5): 443—451.
- [11] CHINGA, G. Shape descriptors plugin in ImageJ [EB/OL]. [2008-03-19]. <http://www.gcscn.net/IJ/Shapes.html>
- [12] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. **Geotechnique**, 1986, 36(1): 65—78.
- [13] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[C]// *Proceedings of the Royal Society of London*. London: [s. n.], 1962: 500—527.
- [14] FANNIN R J, ELIADORANI A, WILKINSON J M T. Shear strength of cohesionless soils at low stress[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(6): 467—478.
- [15] CHO G C. Saturation effects and post-liquefaction shear strength[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2001.