

DOI: 10.11779/CJGE20220535

# 细颗粒形状和含量对钙质混合砂强度的影响试验研究

李 涛, 赵洪扬, 翁勃航, 黄晓冀, 张钟毓

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为研究不同细颗粒含量及形状对钙质混合砂力学特性的影响, 采用角形石英粉和圆形玻璃珠作为细颗粒材料, 按不同配比分别与钙质砂混合, 通过环剪试验对钙质混合砂强度特性和破碎特征进行研究。结果表明: 两种混合砂在中密状态下软化特性明显, 软化系数随细颗粒含量的增加, 呈现出先增大后减小的规律, 在细颗粒含量为 10%时达到最大值, 细颗粒含量相同时, 含玻璃珠试样的软化系数更大; 钙质砂存在明显的表观黏聚力, 并随着细颗粒含量增加而减小, 含玻璃珠试样因嵌固咬合能力更低, 其下降趋势明显大于含石英粉试样; 纯钙质砂变形表现为剪胀, 随着细颗粒含量增加, 混合砂剪缩量逐渐增加, 峰值强度、相对破碎率逐渐降低, 含玻璃珠混合砂变化更为显著。

**关键词:** 钙质混合砂; 细颗粒含量; 颗粒形状; 抗剪强度; 颗粒破碎

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1517-09

作者简介: 李 涛(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、城市地下工程方面的研究工作。E-mail: litaocumtb@163.com。

## Experimental study on effects of shape and content of fine particles on strength of calcareous mixed sand

LI Tao, ZHAO Hongyang, WENG Bohang, HUANG Xiaoji, ZHANG Zhongyu

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the influences of different contents and shapes of fine particle on the mechanical properties of calcareous mixed sand, the angular quartz powder and round glass beads are used as the fine particle materials and mixed with the calcareous sand in different proportions, and the strength characteristics and crushing characteristics of the calcareous mixed sand are studied and analyzed through the ring shear tests. The results show that the softening characteristics of the two kinds of mixed sand are obvious in the medium density state. The softening coefficient increases first and then decreases with the increase of the fine content, and reaches the maximum value when the fine content is 10%. The softening coefficient of the samples containing the glass beads is larger when the fine content is the same. The apparent cohesion of the calcareous sand is obvious and decreases with the increase of the fine content, and the decreasing trend of the samples containing the glass beads is obviously larger than that of the samples containing the quartz powder because of their lower embedding and biting capability. The deformation of the pure calcareous sand appears in the form of dilatancy, and with the increase of the content of the fine particle, the shear shrinkage of the mixed sand gradually increases, the peak strength and relative breakage rate gradually decrease, and the change of the mixed sand containing the glass beads is more significant.

**Key words:** calcareous mixed sand; fine particle content; particle shape; shear strength; particle crushing

## 0 引言

近年来, 中国大力发展战略性新兴产业, 钙质砂作为沿海地区的主要岩土体受到广泛使用。有别于陆源石英砂, 钙质砂作为难溶类碳酸盐(多为碳酸钙)物质的集合体, 具有形状不规则、内孔隙高、颗粒易破碎、棱角度高等性质<sup>[1-3]</sup>。国内外学者对于钙质砂的力学特性开展了大量研究: 张晨阳等<sup>[4]</sup>分析了细粒含量对钙质砂力学特性的影响, 认为钙质砂峰值偏应力与剪胀性随细粒含量的增加而逐渐减小; 黄宏

翔等<sup>[5]</sup>得出在相同条件下, 钙质砂的抗剪强度和残余强度均大于石英砂; Rui 等<sup>[6]</sup>发现不规则颗粒形状的钙质砂表现出较慢的累积孔隙压力速率, 显示出更高的抗液化性。对于钙质砂的颗粒破碎特性, 研究表明在低围压情况下就会发生颗粒破碎, 颗粒形状对其力学性质的影响较大, 在高围压情况下钙质砂颗粒破碎情

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508556); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJSLJ14); 越崎青年学者项目(800015Z1166)

收稿日期: 2022-05-05

况加剧, 颗粒破碎对其力学性质影响愈加显著<sup>[7]</sup>。Coop 等<sup>[8]</sup>指出钙质砂的颗粒破碎程度受轴向应力大小及初始颗粒形状影响; 汪轶群等<sup>[9]</sup>在三轴试验中发现随着初始围压的增大, 钙质砂颗粒破碎程度加大, 土样整体剪胀趋势减小, 且破碎引起的能量耗散增加。

上述研究为以钙质砂的颗粒特性为切入点, 对其力学性质进行了研究。但主要以钙质砂作为纯净砂进行分析, 而仅考虑某一粒径、某一种类砂土多与实际工程情况不符, 存在一定的局限性。中国南海地区广泛分布源于岛礁中的碳酸盐土体和沿岸地区的非碳酸盐类土所结合的碳酸盐混合土<sup>[10]</sup>, 其力学性质势必由两种土体共同决定。李小刚等<sup>[11]</sup>通过三轴试验发现, 混合砂峰值强度和相对破碎率随石英砂含量的增加而减小, 黏聚力及峰值内摩擦角随碳酸盐含量的增加而增加。Lade 等<sup>[12]</sup>指出土体中粉土、粉砂等细颗粒的含量是海底斜坡、土坝和路堤等产生液化破坏的主要原因。含细颗粒土体的试验同样表明细颗粒含量、粒径分布和颗粒形状特征是影响砂土抗剪强度和液化反应的主要因素<sup>[13-15]</sup>, 且细颗粒含量与粉土特性对砂土静态液化行为的影响存在耦合关系<sup>[16]</sup>。此外, 砂土中不同颗粒特征的粗颗粒和细颗粒相互作用, 对混合土体的整体力学性质也产生显著影响<sup>[17-18]</sup>。

综上所述, 细颗粒对钙质混合土体力学性质影响显著, 而现有研究中多数仅考虑钙质细粒含量对钙质砂力学特性的影响, 在对钙质混合砂的研究中, 细颗粒特征不同对混合砂的影响程度亦不同。基于此, 本文采用角形石英粉和圆形玻璃珠作为细颗粒, 分别与钙质砂混合, 对钙质混合砂进行不同轴向压力条件下的环剪试验, 探究不同细颗粒含量及形状对钙质混合砂峰值强度、残余强度和轴向变形的影响, 对钙质混合砂的颗粒破碎特征进行研究分析, 进一步探讨颗粒破碎特征对钙质混合砂性质的影响规律, 从而为南海地区工程建设提供参考。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验材料

试验所用钙质砂取自南海区域某岛礁附近。试验前先将砂样烘干, 采用标准筛进行筛分, 得到粒径范围为0.1~1 mm 的钙质砂颗粒。玻璃珠因具有与土体相似的矿物学特征<sup>[19]</sup>, 多用于模拟砂土, 其形状接近理想的球形; 石英粉则更具棱角和不规则性。因此, 采用粒径小于0.075 mm 的石英粉及玻璃珠模拟混合砂中不同形状的石英细颗粒。3类基本砂样的物理指标参数见表1, 颗粒级配曲线见图1。按试样总质量的0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 将石英粉、玻璃珠细颗粒分别与钙质砂均匀混合得到9种试样: 含石英粉试样, 由J10, J20, J30, J40表示; 含玻璃珠试样, 由 Y10,

Y20, Y30, Y40表示; 0表示纯钙质砂试样。

表 1 基本砂样的物性指标

Table 1 Physical properties of basic sand samples

试 样	圆 度	宽长比	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{60}/\mu\text{m}$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	相对质量密度
钙质砂	0.517	0.541	374.5	637.7	643.5	1.72	1.28	2.75
玻璃珠	0.924	0.893	35.1	50.8	58.6	1.67	0.92	2.64
石英粉	0.635	0.746	27.2	45.7	51.3	1.89	1.05	2.66

注: ①圆度为单颗粒投影面积与等周长圆面积之比; 宽长比为单颗粒最小Feret 直径与最大 Feret 直径之比。②圆度、宽长比取采样(1000粒)均值。

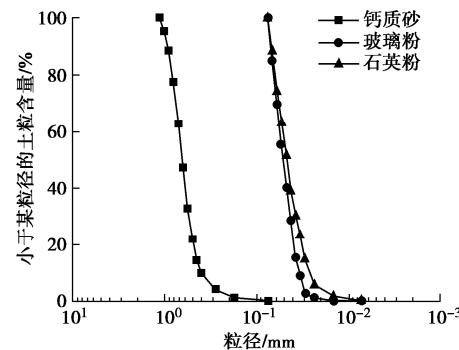


图 1 3 种砂样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of three kinds of sand particles

为定量化表示土体形态特征, 多通过颗粒形状扫描仪器, 根据颗粒轮廓图像建立二维形状参数(圆度、宽长比、粗糙度等), 能够较好地表述颗粒形状与其力学性质之间的关系<sup>[20-22]</sup>。对于二元颗粒混合物, 参考 Yang 等<sup>[23]</sup>提出的组合形状参数概念, 认为二元混合物组合形状参数由各颗粒材料的形状特征值及其对应的质量占比决定, 组合圆度、组合宽长比越接近于1, 表明颗粒整体越接近于圆形、越规整。如钙质混合砂 J30 的组合圆度、组合宽长比计算分别为

$$S_{c-J30} = S_{c-J} \times F_c + S_{c-G} \times (1 - F_c) \\ = 0.635 \times 30\% + 0.517 \times 70\% = 0.552 \quad , \quad (1)$$

$$A_{r-J30} = A_{r-J} \times F_c + A_{r-G} \times (1 - F_c) \\ = 0.746 \times 30\% + 0.541 \times 70\% = 0.603 \quad . \quad (2)$$

图像颗粒分析仪如图2所示, 扫描基本砂样轮廓图如图3所示, 混合砂样特性指标如表2所示。

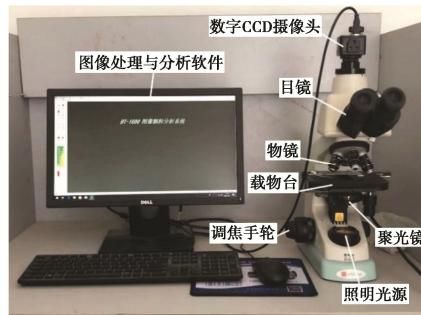


图 2 BT-1600 图像颗粒分析仪

Fig. 2 BT-1600 image particle analyzer

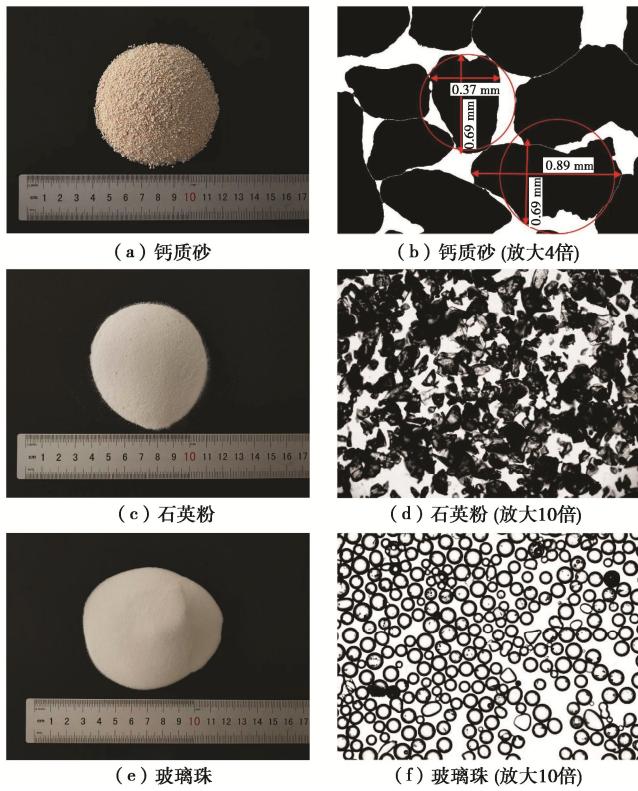


图 3 3 种砂样图及其二维扫描图

Fig. 3 Photos of three kinds of sand samples and 2D scans

表 2 混合砂样特性指标

Table 2 Characteristics of mixed sand samples

砂样	相对密实度 $D_r/\%$	最大孔隙比 $e_{max}$	最小孔隙比 $e_{min}$	组合圆度 $S_c$	组合宽长比 $A_r$
0	60	1.109	0.812	0.517	0.541
J10	60	1.010	0.707	0.529	0.562
J20	60	0.893	0.553	0.541	0.582
J30	60	0.794	0.467	0.552	0.603
J40	60	0.743	0.430	0.564	0.623
Y10	60	0.977	0.724	0.558	0.541
Y20	60	0.856	0.605	0.598	0.576
Y30	60	0.744	0.512	0.639	0.611
Y40	60	0.685	0.491	0.680	0.647

## 1.2 试验方案

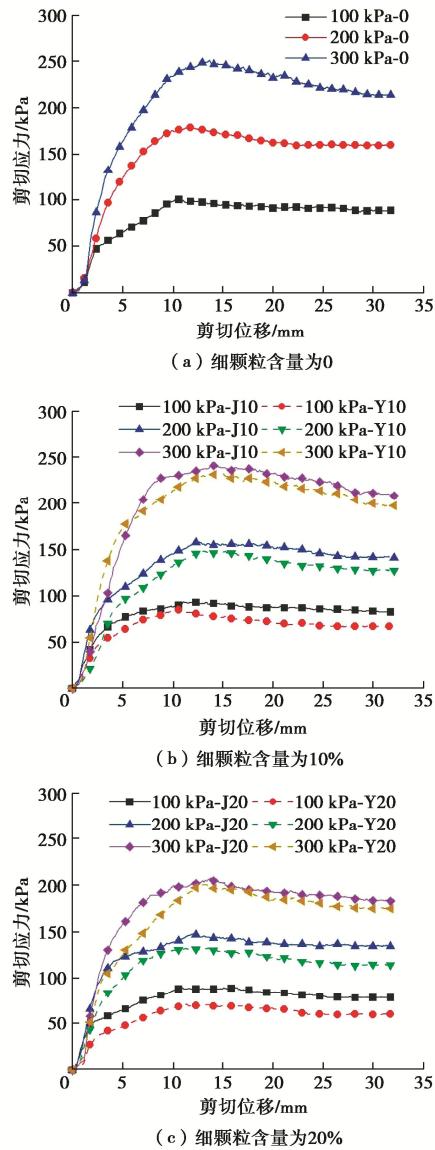
试验采用 HJ-1 型环剪仪, 其试样尺寸为外径 100 mm, 内径 60 mm, 高 20 mm。天然状态下土体的相对密实度在 20%~80%, 且天然密实度多为中密状态<sup>[24]</sup>, 故考虑实际工程情况, 控制钙质混合砂的相对密实度  $D_r=60\%$  (中密), 进行不同轴向压力条件下的环剪试验。试验步骤如下: ①采用漏斗法将试样装入容器。首先, 将环剪仪的上、下剪切盒固定在一起, 然后将试样缓慢倒入漏斗之中, 通过漏斗将砂样以零高度的落差缓慢倒入盒中, 最后将试样抚平, 使其高度一致。②采用浸水法饱和试样。试样装好后倒入蒸馏水, 使其完全浸没, 浸泡 4 h 确保试样饱和度达到要求。浸泡完成后将仪器组装完成。③逐级施加 100, 200, 300 kPa 的轴向压力, 待固结完成后, 以  $1^\circ / \text{min}$  的剪切

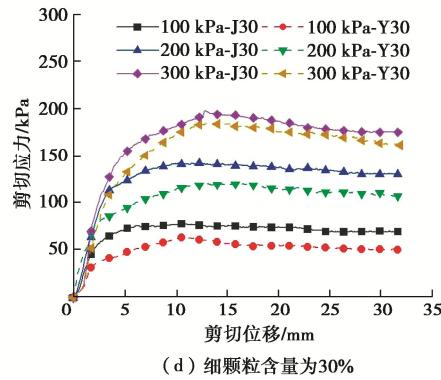
速率进行环向剪切试验。

## 2 试验结果分析

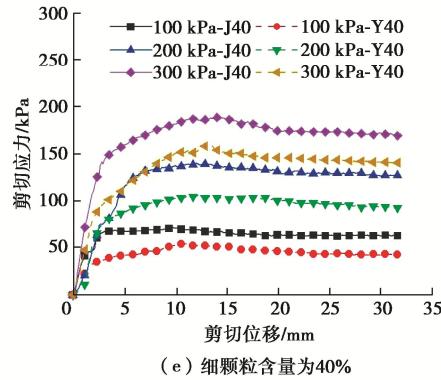
### 2.1 剪切应力-剪切位移曲线分析

试验结束后, 得到不同细颗粒含量及形状条件下的剪切应力-剪切位移曲线, 如图 4 所示。由图 4 (a) 可得, 纯钙质砂的剪切应力随着剪切位移的增加而逐渐增加, 呈近线性增长, 随后, 剪切应力的增长趋势变缓。当轴向压力为 100, 200, 300 kPa 时, 剪切应力分别在剪切位移为 10.5, 11.9, 13.6 mm 时达到峰值强度, 其值分别为 100.4, 177.9, 251 kPa; 剪切位移分别在 28, 30, 31 mm 处得到土样的残余强度, 其值分别为 88.23, 159.4, 213.51 kPa。由各应力-位移图线得: 各组试样的抗剪强度均随轴向压力的增加而增大; 当剪切位移相同时, 轴向压力越大, 试样的剪切应力越大; 同时, 随轴向压力的增加, 各组试样峰值强度出现延后性, 且各组试样的应力-位移曲线均呈现软化特性。





(d) 细颗粒含量为30%

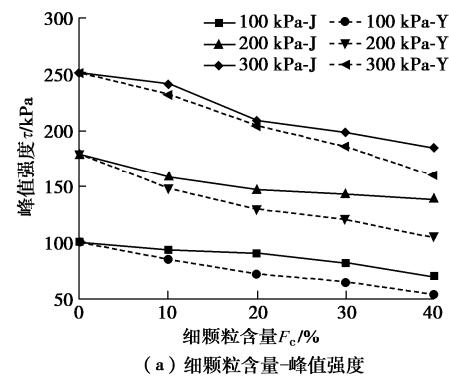


(e) 细颗粒含量为40%

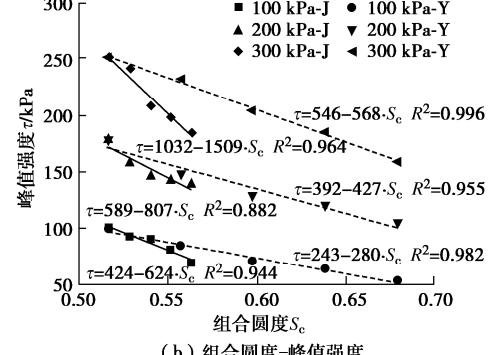
图4 剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curve

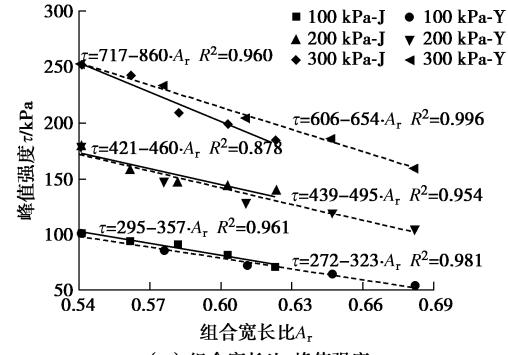
对不同细颗粒含量及形状条件下钙质混合砂的峰值强度进行统计并绘制图5。如图5(a)所示，随着细颗粒含量的增加，混合砂峰值强度逐渐降低。与纯钙质砂相比，细颗粒含量为10%时，混合砂的峰值强度略小于纯钙质砂，其中，含石英粉混合砂峰值强度最大降幅为12%，含玻璃珠混合砂峰值强度最大降幅为16%，此时细颗粒填充土体骨架的孔隙部分，土体骨架仍由钙质砂颗粒组成；细颗粒含量为20%时，含石英粉混合砂峰值强度最大降幅为17%，含玻璃珠混合砂峰值强度最大降幅为29%；细颗粒含量为30%时，峰值强度持续降低，含石英粉混合砂峰值强度最大降幅为22%，含玻璃珠混合砂峰值强度最大降幅扩大至36%；当细颗粒含量增加至40%，峰值强度发生大幅度降低，含石英粉混合砂峰值强度最大降幅为30%，含玻璃珠混合砂峰值强度最大降幅则高达47%，表明此时土体骨架由钙质砂颗粒承担转变为钙质砂、细颗粒共同承担。此外，如图5(b)，(c)所示，峰值强度受细颗粒形状影响，随组合圆度和组合宽长比增加而逐渐减小，含玻璃珠混合砂出现更大降幅。结合剪切应力-剪切位移曲线（图4）中含玻璃珠混合砂的曲线波动更为明显，表明细颗粒形状的改变影响了骨架颗粒间的接触状态以及力链传递，进而降低土体骨架的稳定性，圆形细颗粒的加入使得土体骨架的稳定性更差。各组试样峰值强度及下降幅度如表3所示。



(a) 细颗粒含量-峰值强度



(b) 组合圆度-峰值强度



(c) 组合宽长比-峰值强度

图5 不同细颗粒含量及形状下的峰值强度

Fig. 5 Peak intensities at different contents and shapes of fine particles

## 2.2 不同细粒含量及形状下的强度指标特征

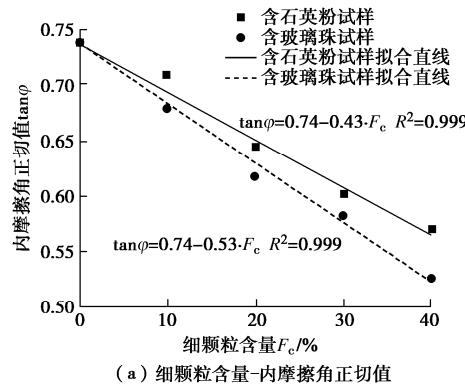
图6为混合砂内摩擦角随组合形状参数的变化规律。纯钙质砂的内摩擦角正切值为0.74 ( $\varphi=36.4^\circ$ )，混合砂内摩擦角正切值随细颗粒含量、组合圆度及组合宽长比增加均表现线性减小趋势。在细颗粒含量为40%时，组合宽长比和组合圆度达到最大值，混合砂的整体颗粒形状趋于规整，含石英粉混合砂内摩擦角正切值达到最小值0.57 ( $\varphi=29.7^\circ$ )，其降幅为23%；含玻璃珠混合砂的内摩擦角正切值为0.53 ( $\varphi=27.8^\circ$ )，其降幅为28%，此时表现出更小的抗剪强度。原因在于，细颗粒的填充降低了土体骨架的稳定性，在粗颗粒间起到润滑的作用，降低了颗粒间的摩擦，因而内摩擦角逐渐减小；玻璃珠因颗粒形状圆滑，随着细颗粒含量的增加，混合砂的组合形状参数逐渐接近圆形颗粒的形状参数，颗粒之间运动产生的逐渐摩

表3 不同轴向压力下试样的峰值强度及下降幅度

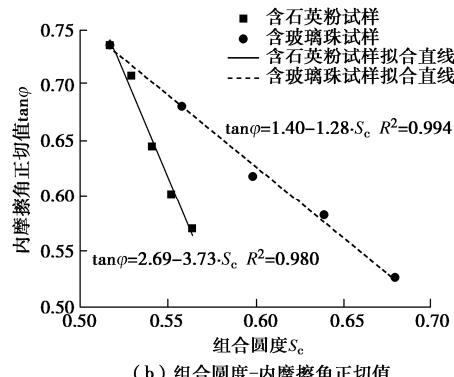
Table 3 Peak strengths and decrease amplitudes of samples under different axial pressures

轴压	类别	0	J10	J20	J30	J40	Y10	Y20	Y30	Y40
100 kPa	峰值强度/kPa	100.4	93.6	90.7	78.0	70.2	84.8	71.7	64.3	53.6
	降幅/%	—	7	10	22	30	16	29	36	47
200 kPa	峰值强度/kPa	177.9	156.5	148.7	142.3	139.4	148.7	133.6	120.9	105.3
	降幅/%	—	12	16	20	22	16	25	32	41
300 kPa	峰值强度/kPa	251.0	241.3	208.1	198.4	188.6	232.0	201.3	185.2	158.9
	降幅/%	—	4	17	21	25	8	20	26	37

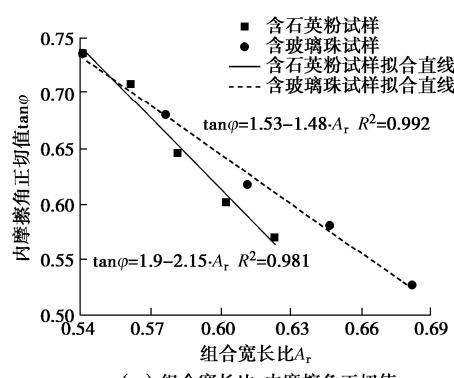
擦力较小, 而石英粉的颗粒形状较不规则, 在颗粒间的相对运动中, 不利于滚动, 需要较多的力进行滑动, 故含玻璃珠混合砂的内摩擦角呈现更大的降幅。



(a) 细颗粒含量-内摩擦角正切值



(b) 组合圆度-内摩擦角正切值



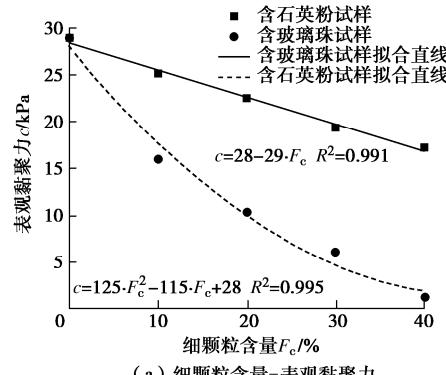
(c) 组合宽长比-内摩擦角正切值

图6 不同细颗粒含量及形状下的内摩擦角

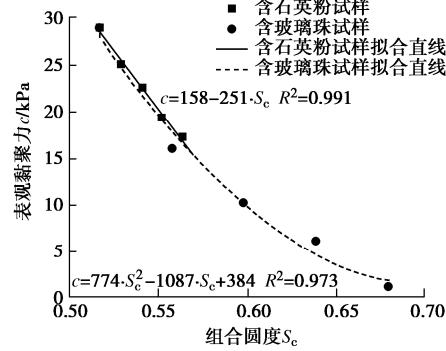
Fig. 6 Angles of internal friction at different contents and shapes of fine particles

钙质砂为无黏性土, 但由于具有不规则的颗粒形状, 颗粒之间的嵌固咬合作用产生了不可忽视的表观黏聚力<sup>[25]</sup>。图7为混合砂表观黏聚力随颗粒含量及组合形状参数的变化规律。试验发现, 随着细颗粒含量的增加, 混合砂表观黏聚力由纯钙质砂时的28 kPa 开

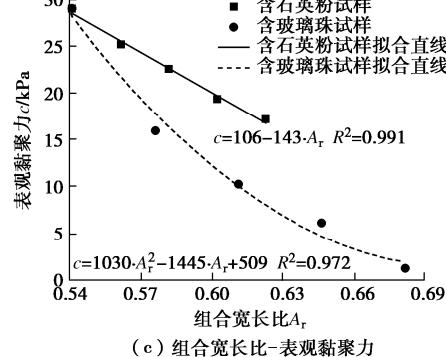
始逐渐降低, 含石英粉混合砂的表观黏聚力降幅较小, 最终降至17.2 kPa, 而含玻璃珠的混合砂表观黏聚力呈现出较大的下降趋势, 最终仅为1.2 kPa。其原因是, 随着细颗粒含量的增加, 钙质砂颗粒所形成的骨架逐渐被细颗粒填充, 减少了钙质砂颗粒之间的接触, 进而降低了钙质砂颗粒之间的嵌固咬合作用; 当细颗粒含量为40%时, 土体骨架由钙质砂及细颗粒共同承担, 由于外形更接近于球形的玻璃珠细颗粒并不具有咬合能力, 导致含玻璃珠混合砂的表观黏聚力大幅下降。



(a) 细颗粒含量-表观黏聚力



(b) 组合圆度-表观黏聚力



(c) 组合宽长比-表观黏聚力

图7 不同细颗粒含量及形状下的表观黏聚力

Fig. 7 Apparent cohesions at different contents and shapes of fine particles

### 2.3 不同细粒含量及形状下的残余强度特征

为定量化表述钙质混合砂的残余强度特性,采用软化系数  $I_B$  分析混合砂在剪切试验后的应变软化程度。 $I_B$  越大,说明砂样的强度在峰值后衰减程度越大,软化越明显,试样的变形稳定性越低。其公式为<sup>[26]</sup>

$$I_B = \frac{\sigma_{dp} - \sigma_{dr}}{\sigma_{dp}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{dp}$  为剪切破坏时的峰值强度 (kPa);  $\sigma_{dr}$  为剪切破坏后残余强度 (kPa)。

图 8 为不同细颗粒含量和形状条件下混合砂的软化系数。随着轴向压力的增大,各组混合砂的软化系数均呈现先减小后增加的趋势,轴向压力为 200 kPa 时,各组试样软化系数最小,试样相对稳定。细颗粒含量为 10% 时软化系数达到最大值,混合砂的强度在峰值后变化最大,软化程度明显。细颗粒含量超过 10% 后,混合砂的软化系数随着细颗粒含量的增加而减小,且在细颗粒含量为 40% 时软化系数达到最小值。含石英粉混合砂的软化系数明显小于含玻璃珠混合砂,表明含石英粉混合砂的变形稳定性较高,剪切应力在峰值强度后的衰减较少。混合砂中玻璃珠含量为 10% 时,软化最为明显,软化系数达到最大值,其数值均在 0.14 以上,其原因主要是由于细颗粒含量的增加,充填在钙质砂颗粒所组成骨架的孔隙中,而玻璃珠因其颗粒形状较为圆滑,在颗粒运动中起到了润滑作用,使得含玻璃珠的钙质砂混合砂受到较小的力时就能发生颗粒运动,因此试样的变形稳定性较低,在强度达到峰值后有着较大的衰减程度。与张晨阳等<sup>[4]</sup>研究结果类似,在细粒含量为 10% 时稳定性最差,后续随着细颗粒含量的不断增加,钙质砂的软化系数逐渐降低,试样稳定性逐渐提高。

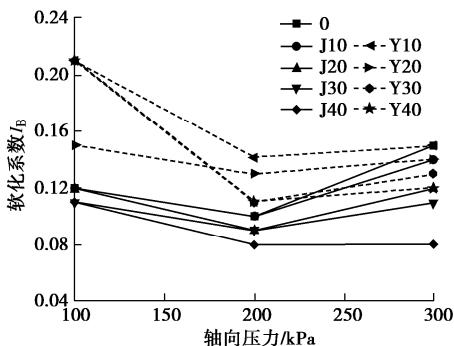


图 8 不同轴向压力条件下试样的脆性指标

Fig. 8 Brittleness indexes of samples at different axial pressures

### 2.4 不同细粒含量及形状下的变形特征

钙质混合砂在环剪过程中的轴向位移变化可在一定程度上反映出其剪胀特征。图 9 为轴向压力 100 kPa 时环剪试验的轴向位移变形结果。从图 9 中可以看出,纯钙质砂在剪切开始时出现小幅度剪缩,随着剪切位

移不断增加,出现明显的剪胀现象,最大剪胀量为 -0.438 mm。由图 9 (a) 可知,当含石英粉的混合砂中细颗粒含量分别为 10%, 20%, 30%, 40% 时,最大剪缩量为 0.181, 0.203, 0.26, 0.536 mm。表明随着细颗粒含量的增加,混合砂的变形特征逐渐由剪胀状态转变为剪缩状态。由图 9 (b) 可知,当含玻璃珠混合砂中细颗粒含量为 10%, 20%, 30%, 40% 时,最大剪缩量为分别为 0.261, 0.331, 0.421, 0.604 mm。表明同一围压下随着细颗粒含量的增加,试样的剪胀性逐渐减小,剪缩状态逐渐明显,当细颗粒含量为 10%~30% 时,两种不同细颗粒的混合砂的轴向变形都较为接近,相差幅度较小,当细颗粒含量增加至 40% 时,其轴向变形的增长趋势明显增加,且含玻璃珠的混合砂的剪缩量比含石英粉的混合砂具有明显的增长趋势,且剪缩特征更加明显。

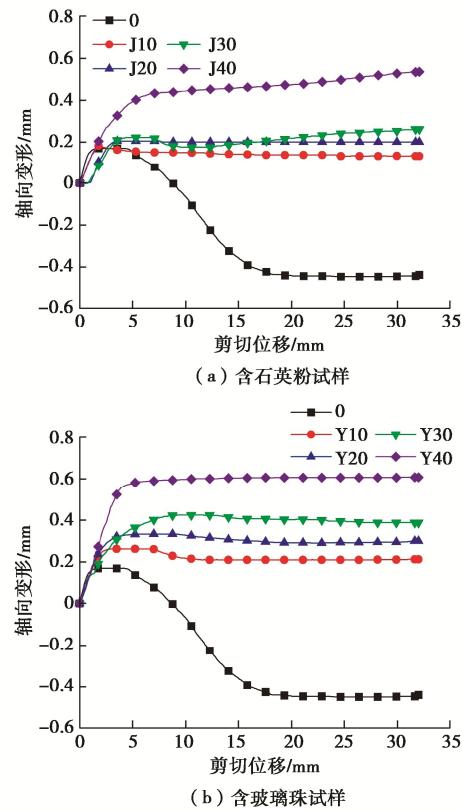


图 9 轴向变形-剪切位移关系曲线

Fig. 9 Axial deformation-shear displacement curves

为研究不同轴向压力条件下混合砂的轴向变形情况,对细颗粒含量为 20% 和 40% 的混合砂的轴向变形进行汇总分析,如图 10 所示。由图 10 (a) 可知,细颗粒含量为 20% 的混合砂在轴向压力为 100 kPa 时,轴向位移先逐渐增大,随后发生小幅度的减小,最后趋于稳定,两种混合砂的最大剪缩量分别为 0.203, 0.262 mm; 当轴向压力为 200 kPa 时,混合砂均呈现出明显的剪缩特征,剪缩量随剪切位移增加而增加,两种混合砂的最大剪缩量分别为 0.41, 0.662 mm; 轴向压力

为300 kPa时, 混合砂均呈现出较大的剪缩特征, 随着剪切位移的增加, 两种混合砂的最大剪缩量分别为0.723, 0.834 mm。如图10(b)所示, 细颗粒含量为40%时混合砂均表现出明显的剪缩特征。随着剪切位移的增加, 剪缩量呈现出不断上升的趋势, 且随着轴向压力的增加, 两种混合砂的最大剪缩量分别达到0.536, 0.604, 0.718, 0.843, 0.974, 1.181 mm。表明随着轴向压力不断增加, 混合砂的最大剪缩量逐渐增加, 呈现出明显的剪缩特征, 是因为随着轴向压力不断增加, 试样在剪切过程中发生较大幅度的颗粒破碎现象, 大颗粒逐渐减少, 致使混合砂的剪缩现象显著。

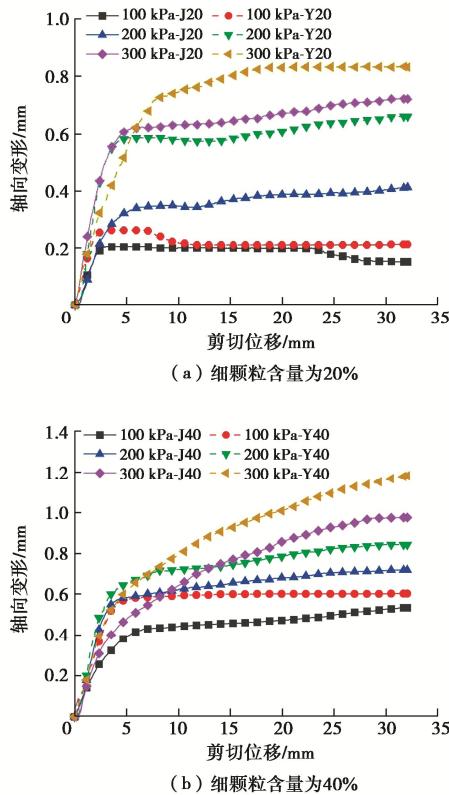


图 10 细颗粒含量为 20% 和 40% 的钙质混合砂的轴向变形-剪切位移关系曲线

Fig. 10 Axial deformation-shear displacement curves for calcareous mixed sand with fine particles contents of 20% and 40%

### 3 颗粒破碎特征

钙质混合砂特殊的剪切特征主要是由于其颗粒特征和颗粒破碎等多重因素共同作用的结果, 为了对不同细颗粒含量及形状条件下混合砂的剪切过程进行细观分析, 需建立细颗粒含量及形状与颗粒破碎之间的联系。对剪切后试样进行颗粒级配试验, 得到剪切前后各组试样的颗粒级配曲线, 采用 Hardin<sup>[27]</sup>所提出的相对破碎指标  $B_r$  进行颗粒破碎的定量化评价, 相对颗粒破碎率的计算原理如图11所示, 其计算公式如下:

$$B_r = \frac{B_t}{B_{p0}} \quad . \quad (4)$$

式中:  $B_{p0}$  为初始破碎势, 即试样试验前级配曲线的积分;  $B_t$  为总破碎势, 即试验前后的整体破碎势之差。

图 12 为不同细颗粒含量及形状条件下钙质混合砂的破碎关系图。由图 12 可知, 各组混合砂的相对破碎率均小于 3%。在轴向压力为 100, 200, 300 kPa 条件下, 试样的最大破碎率分别为 0.9%, 1.3%, 2.4%。表明随轴向压力的不断增加, 更多的钙质砂颗粒发生破碎, 混合砂的颗粒破碎度呈现出不断上升的趋势。在细颗粒含量 0~40% 的增长过程中, 当轴向应力为 100 kPa 时, 两种混合砂的相对破碎率由 0.9% 分别减小至 0.41% 和 0.29%; 当轴向应力为 200 kPa 时, 两种混合砂的相对破碎率由 1.3% 分别减小至 0.87% 和 0.78%; 当轴向应力为 300 kPa 时, 两种混合砂的相对破碎率由 2.4% 分别减小至 1.88% 和 1.78%, 该现象是因为细颗粒含量的增加降低了钙质砂之间的咬合程度, 颗粒破碎率也随之减小。与含玻璃珠混合砂的相对破碎率相比, 含石英粉混合砂的相对破碎率更高, 二者差值在 0.07%~0.16%, 其主要原因是石英粉的颗粒形状与玻璃珠相比更为不规则, 棱角度较高, 对于钙质砂颗粒之间的咬合降低程度较小, 致使含石英粉的钙质混合砂有着较高的颗粒破碎率。

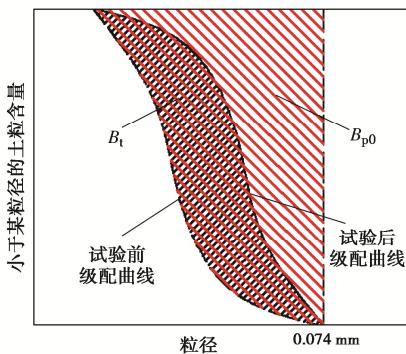


图 11 相对颗粒破碎率示意图

Fig. 11 Diagram of relative particle fragmentation rate

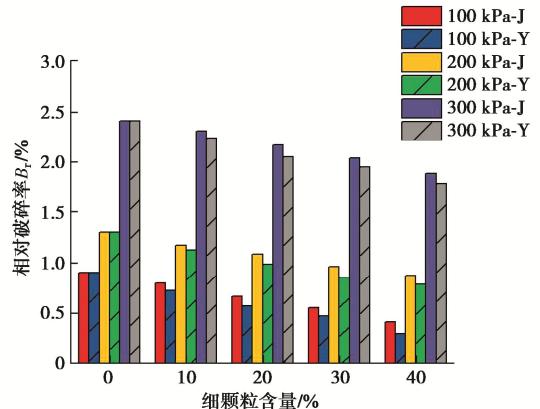


图 12 不同细颗粒含量及形状条件下钙质混合砂的破碎关系图

Fig. 12 Crushing relationship of calcareous mixed sand under different contents and shapes of fine particles

图13为钙质混合砂的相对破碎率随组合形状参数

变化趋势图。由图13可知,混合砂的相对破碎率随着细颗粒含量的增加不断减小,与组合圆度及组合宽长比均表现出线性负相关关系,表明当混合砂整体的组合形状参数越偏离球形颗粒,颗粒轮廓呈现枝状时,其破碎程度越高。细颗粒含量的增加使得混合砂整体的组合形状参数向球形颗粒靠近,包围在钙质砂周围细颗粒增加,减少了钙质砂颗粒之间的接触,起到润滑作用,使得颗粒破碎程度不断降低。玻璃珠含量的不断增加,表现出更为明显的润滑作用,且混合砂整体的组合形状参数更加趋近球形颗粒的形状参数,含玻璃珠混合砂的颗粒破碎程度明显较小。

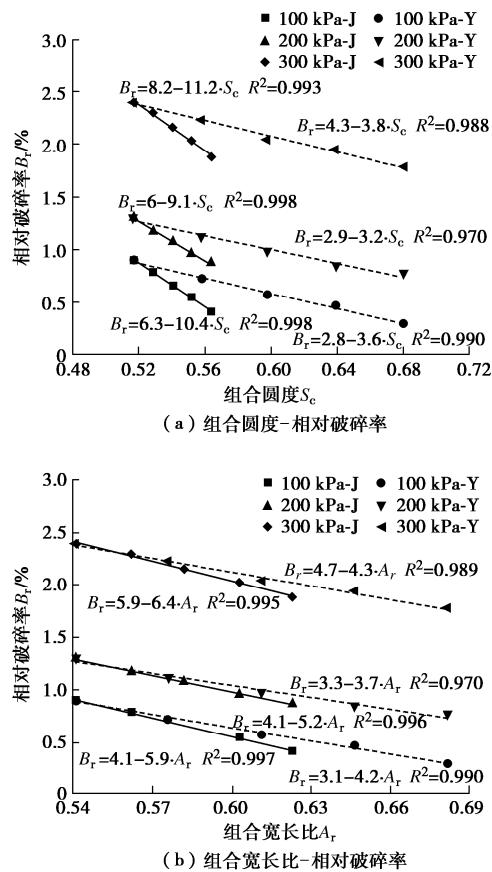


图 13 相对破碎率与组合形状参数关系图

Fig. 13 Relationship between relative crushing rate and composite shape parameters

## 4 结 论

通过对不同细颗粒形状及含量条件下的钙质混合砂进行环剪试验,分析细颗粒形状及含量间的差异对钙质混合砂力学特性及破碎特性的影响,得到以下5点结论。

(1) 钙质混合砂的应力-位移曲线均呈现软化特性,含圆形玻璃珠混合砂的峰值强度明显小于含角形石英粉混合砂的峰值强度,随着细颗粒含量不断增加,混合砂的峰值强度逐渐降低,且含玻璃珠混合砂峰值

强度有着更大的降低趋势。

(2) 钙质混合砂的强度指标随细颗粒含量、组合圆度、组合宽长比增加均呈现减小趋势。由于玻璃珠表面圆滑,致使含玻璃珠混合砂表现出更低的内摩擦角和表现黏聚力。

(3) 钙质混合砂的软化系数随轴向压力的增加先减小后增大,在200 kPa时达到最小值,并随细颗粒含量增加表现出先增大后减小的变化趋势,当细颗粒含量为10%时,软化系数最大,当细颗粒含量超过10%后,混合砂的软化系数逐渐减小,且含石英粉试样的软化系数明显低于含玻璃珠试样。

(4) 纯钙质砂表现出明显的剪胀,且随细颗粒含量和轴向压力增加,混合砂的剪缩量逐渐增大,当细颗粒含量达到40%时呈现出明显的剪缩,含玻璃珠混合砂的剪缩增量更大。

(5) 在不同轴压下,钙质混合砂的相对破碎率与组合圆度及组合宽长比均呈线性负相关,且轴压的增加会造成相对破碎率的增加。随细颗粒含量的增加,混合砂组合形状参数趋于球形形状参数,颗粒破碎程度减小,含玻璃珠混合砂具有更小的相对破碎率。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈海洋, 汪 稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389-1392. (CHEN Haiyang, WANG Ren, LI Jianguo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1389-1392. (in Chinese))
- [2] 王新志, 王 星, 刘海峰, 等. 珊瑚礁地基工程特性现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2065-2070, 2079. (WANG Xinzh, WANG Xing, LIU Haifeng, et al. Field test study of engineering behaviors of coral reef foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2065-2070, 2079. (in Chinese))
- [3] 马成昊, 朱长歧, 刘海峰, 等. 土的颗粒形貌研究现状及展望[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2041-2058. (MA Chenghao, ZHU Changqi, LIU Haifeng, et al. State-of-the-art review of research on the particle shape of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2041-2058. (in Chinese))
- [4] 张晨阳, 谌 民, 胡明鉴, 等. 细颗粒组分含量对钙质砂抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 195-202. (ZHANG Chenyang, CHEN Min, HU Mingjian, et al. Effect of fine particles content on shear strength of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 195-202. (in Chinese))
- [5] 黄宏翔, 陈育民, 王建平, 等. 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2082-2088. (HUANG Hongxiang, CHEN Yumin, WANG Jianping, et al. Ring shear

- tests on shear strength of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(6): 2082-2088. (in Chinese))
- [6] RUI S J, GUO Z, SI T L, et al. Effect of particle shape on the liquefaction resistance of calcareous sands[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **137**: 106302.
- [7] WANG S, LEI X W, MENG Q S, et al. Influence of particle shape on the density and compressive performance of calcareous sand[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, **24**(1): 49-62.
- [8] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS FREITAS T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, **54**(3): 157-163.
- [9] 汪轶群, 洪义, 国振, 等. 南海钙质砂宏细观破碎力学特性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 199-206, 215. (WANG Yiqun, HONG Yi, GUO Zhen, et al. Micro-and macro-mechanical behavior of crushable calcareous sand in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 199-206, 215. (in Chinese))
- [10] 王国忠. 南海北部大陆架现代礁源碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积作用[J]. 古地理学报, 2001, **3**(2): 47-54. (WANG Guozhong. Mixed sedimentation of recent reefoid carbonates and terrigenous clastics in the north continental shelf of the South China Sea[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, **3**(2): 47-54. (in Chinese))
- [11] 李小刚, 朱长歧, 崔翔, 等. 含碳酸盐混合砂的三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(1): 123-131. (LI Xiaogang, ZHU Changqi, CUI Xiang, et al. Experimental study of triaxial shear characteristics of carbonate mixed sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(1): 123-131. (in Chinese))
- [12] LADE P V, YAMAMURO J A. Evaluation of static liquefaction potential of silty sand slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(2): 247-264.
- [13] WANG Y, WANG Y L, WANG Y, et al. Study of effects of fines content on liquefaction properties of sand[C]// GeoShanghai International Conference 2010. June 3-5, 2010, Shanghai, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2010: 272-277.
- [14] MONKUL M M, ETMINAN E, SENOL A. Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **89**: 185-197.
- [15] 李涛, 唐小微. 黏粒和粉粒的共存对砂土静动力液化影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 169-172. (LI Tao, TANG Xiaowei. Experimental study on effect of coexistence of clay and silt on static and dynamic liquefaction of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 169-172. (in Chinese))
- [16] MONKUL M M, ETMINAN E, SENOL A. Coupled influence of content, gradation and shape characteristics of silts on static liquefaction of loose silty sands[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **101**: 12-26.
- [17] YANG J, WEI L M. Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape[J]. Géotechnique, 2012, **62**(12): 1111-1125.
- [18] WEI L M, YANG J. On the role of grain shape in static liquefaction of sand-fines mixtures[J]. Géotechnique, 2014, **64**(9): 740-745.
- [19] CAVARRETTA I, COOP M, O'SULLIVAN C. The influence of particle characteristics on the behaviour of coarse grained soils[J]. Géotechnique, 2010, **60**(6): 413-423.
- [20] CLAYTON C R I, ABBIREDDY C O R, SCHIEBEL R. A method of estimating the form of coarse particulates[J]. Géotechnique, 2009, **59**(6): 493-501.
- [21] KANDASAMI R K, MURTHY T G. Manifestation of particle morphology on the mechanical behaviour of granular ensembles[J]. Granular Matter, 2017, **19**(2): 21.
- [22] 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.
- [23] YANG J, LUO X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, **84**: 196-213.
- [24] 王海波, 吴琪, 杨平. 细粒含量对饱和砂类土液化强度的影响[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 2771-2779. (WANG Haibo, WU Qi, YANG Ping. Effect of fines content on liquefaction resistance of saturated sandy soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 2771-2779. (in Chinese))
- [25] 王新志, 翁贻令, 王星, 等. 钙质土颗粒咬合作用机制[J]. 岩土力学, 2018, **39**(9): 3113-3120. (WANG Xinzhi, WENG Yiling, WANG Xing, et al. Interlocking mechanism of calcareous soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(9): 3113-3120. (in Chinese))
- [26] LIU X Y, LIU E L, ZHANG D, et al. Study on effect of coarse-grained content on the mechanical properties of frozen mixed soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **158**: 237-251.
- [27] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(10): 1177-1192.