

钙质土颗粒咬合作用机制

王新志¹, 翁贻令^{1,2}, 王 星^{1,3}, 陈伟俊^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 广西大学 海洋学院, 广西 南宁 530004; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 形状不规则的钙质土在剪切应力作用下土颗粒之间存在咬合作用, 从而使抗剪强度显著提高。为研究钙质土颗粒的咬合作用机制, 针对不同粒径的钙质土开展三轴固结不排水和固结排水试验, 并对颗粒形状进行了分析, 揭示了钙质土咬合力的形成机制和表现形式。研究表明: ①不规则的颗粒形状是钙质土产生咬合力的前提条件; ②在不同粒径的钙质土中, 因不同形状颗粒的含量存在差异导致咬合力大小也不同; ③咬合力大小受应力水平影响较为明显, 在低围压下咬合作用导致剪胀, 提高内摩擦角; 在高围压下咬合作用克服颗粒强度做功, 造成颗粒破碎, 提高 C 值而降低有效内摩擦角。钙质土颗粒之间的咬合对强度有明显增强作用, 在工程设计中应充分考虑咬合力的影响。

关 键 词: 钙质土; 抗剪强度; 颗粒咬合; 剪胀; 颗粒破碎

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-0000-00

Investigation of interlocking mechanism of calcareous soil

WANG Xin-zhi¹, WENG Yi-ling^{1,2}, WANG Xing^{1,3}, CHEN Wei-jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The interlocking effect of calcareous soil due to irregular particle shapes increases the shear strength markedly under shearing. To investigate the interlocking mechanism of calcareous soil, a series of triaxial tests were carried out for different particle size under consolidation undrained and consolidated drained conditions. Particle shape analysis was also conducted to reveal the formation mechanism and appearance of occlusal force of calcareous soil. The test results show that: i) irregular shape is the essential reason of the occlusion of calcareous soil particles; ii) The difference in the content of particles in different shapes in calcareous soil with different particle size results in different values of occlusal force; iii) the occlusal force of calcareous soil is obviously affected by the stress level. Under low confining pressure, the occlusal action causes dilatancy and increases the internal friction angle, conversely, under high confining pressure, the occlusal action causes particle breakage, raises cohesion, and reduces the internal friction Angle. The occlusion of calcareous soil has obvious enhancement on strength. Therefore, the occlusion of calcareous soil should be considered in engineering design work of coral reef.

Keywords: calcareous soil; shear strength; particle occlusion; shear dilation; particle breakage

1 引 言

钙质土是一种海洋生物成因的特殊岩土材料, 在全球的珊瑚礁区广泛分布, 具有颗粒形状不规则、易破碎、高孔隙比等特征^[1-2]。经典土力学认为无黏性土不具有黏聚力, 而钙质土具有明显区别于陆源土的特征, 其颗粒间的咬合作用对抗剪强度的贡献

较大, 宏观表现为在剪切过程中存在较高的表观黏聚力。由于陆源的沙土颗粒的咬合力较小, 在工程实践中往往忽略其影响, 导致关于咬合作用研究方面的报道较少。陈希哲^[3]通过大量的大型三轴试验与现场试验证明了在碎石土中存在咬合力, 并在工程实践中进行了验证和应用。郭庆国^[4]在对粗粒土抗剪强度的研究中指出, 咬合力是克服剪胀变形所

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 自然科学基金面上项目 (No. 41572297, No.41372318); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 资助 (No.XDA13010203)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572297, 41372318) and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA13010203).

第一作者简介: 王新志, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事珊瑚礁工程地质及岩土力学特性的研究。E-mail: xzwang@whrsm.ac.cn

做之功，随剪胀变形的发展而产生，并受土体密度和法向应力影响。Shinohara 等^[5]对具有不同棱角颗粒的粗粒土进行三轴试验后发现，滑动内摩擦角随颗粒棱角增大而增大，咬合作用增加了试样的孔隙率。Guo 等^[6]对渥太华标准砂和石灰碎石进行三轴试验研究了剪胀和咬合作用，发现峰值应力比有剪胀和咬合作用的共同贡献。蒋明镜等^[7]研究了颗粒间抗转动作用对砂土力学行为的影响，并对砂土的应变软化及剪胀现象进行了深入的分析。刘崇权^[8]和陈海洋^[9]等对钙质土颗粒形状进行了研究，但主要集中在对颗粒形状和颗粒破碎的描述，没有对颗粒形状与咬合力之间的内在联系进行深层次的探讨。张家铭^[10]等通过对取自南沙群岛永暑礁附近海域的钙质砂进行三轴剪切试验，分析了钙质砂颗粒破碎与剪胀对其抗剪强度的影响，但没有分析钙质砂颗粒破碎对颗粒的咬合力、剪切强度的贡献大小。

钙质土因特殊的生物成因及不规则的颗粒形状决定了颗粒间咬合作用对其强度存在重要影响，研究钙质土的咬合作用进而将其运用到工程设计的实践中具有深远的理论和现实意义。本文以不同粒径的钙质土为研究对象，通过对颗粒粒径、排水条件的控制，进行大量的三轴剪切试验，在对抗剪强度指标和颗粒形状进行分析的基础上，探讨钙质土的咬合作用的形成原因、内在机制以及对强度的影响。

2 试验方案设计

本试验所用的钙质土取自中国南沙群岛某珊瑚礁，其典型的颗分曲线如图 1 所示。所取的钙质土来自珊瑚礁的礁坪和泻湖开挖后堆积的混合物，颗粒级配较宽，大小混杂。试验前先对土样进行筛分，剔除粒径大于 10 mm 以上的颗粒，并将土样按粒径大小分为 7 个粒组（图 2），然后对各个粒组的土样进行干密度、相对密度等物性指标测试，结果如表 1 所示。

表 1 钙质土的物性指标
Table 1 Index parameters of Calcareous soils

粒径 / mm	ρ_{dmin} / (g/cm ³)	ρ_{dmax} / (g/cm ³)	G_s	e_{min}	e_{max}
<0.075	1.11	1.45	2.73	0.88	1.46
0.075 0~0.250	1.08	1.30	2.73	1.10	1.53
0.250~0.500	0.93	1.18	2.73	1.32	1.94
0.500~1.000	0.86	1.17	2.73	1.33	2.17
1.000~2.000	0.83	1.20	2.73	1.28	2.29
2.000~5.000	0.80	1.33	2.73	1.06	2.41
5.000~10.000	0.80	1.32	2.73	1.07	2.41

为探究钙质土的抗剪强度与粒径、排水条件的关系，以不同粒径的钙质土为研究对象，分别进行了三轴固结排水（CD）和三轴固结不排水试验（CU）。试样尺寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 120.0 \text{ mm}$ 。试样的密实度、含水率、剪切速率等参数见表 2。

表 2 试验控制条件
Table 2 Test scheme of calcareous soil

试验土样	相对密实度 / %	含水状态	排水条件	有效围压 / kPa	反压 / kPa	剪切速率 / (mm/min)	终止应变 / %
钙质土	60	饱和	CD, CU	50, 100, 200, 400	300	0.6	20

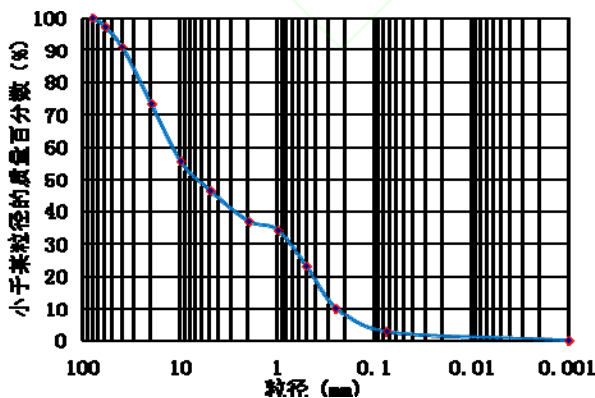


图 1 原始级配钙质土的颗分曲线

Fig.1 Grain size distribution of calcareous soil

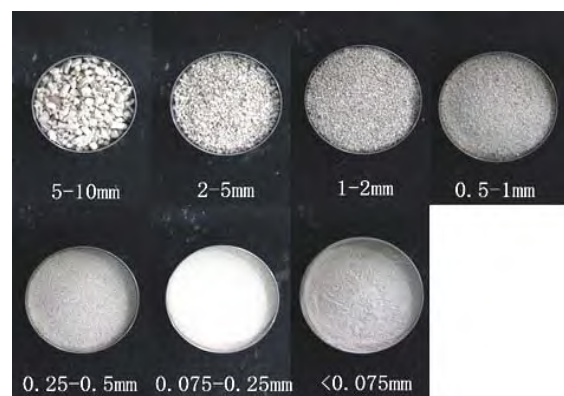


图 2 各粒径钙质土

Fig.2 Different particle size calcareous soils

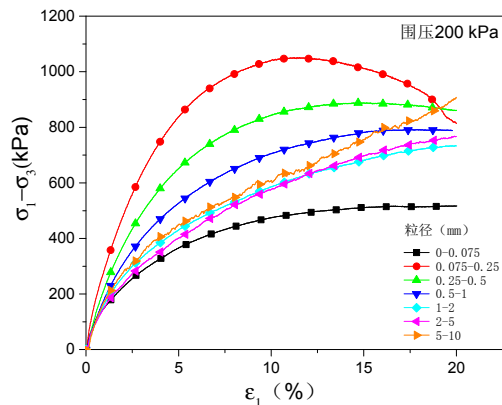
试验所用仪器为全自动应力路径三轴仪，最大轴力为 100 kN，围压、反压、孔隙水压力的量程为 3 MPa，体变测量精度达 0.01 mL，剪切速度在 0.000

1~2.4 mm/min 之间。制样时采用分层装填和压实的方法，以保证土样的均匀性。由于钙质土颗粒含有内孔隙，制样时不易饱和，可采用抽气饱和、水头饱和和联合反压饱和的综合方法。为了进行不同试样的对比，反压均设定为 300 kPa，使用该方法在几小时内即可达到饱和度要求。饱和完成后进行固结，待体积稳定后再进行剪切。试验结束后将试样烘干并进行筛分，对钙质砂在剪切过程中的颗粒破碎情况进行定量分析。通过试验数据处理分析，获取不同条件下的应力-应变关系曲线、体变-轴向应变关系曲线以及试验前后的颗粒级配曲线。为了便于对比分析，在数据处理过程中，固结排水试验取偏应力峰值为破坏点；应变硬化型曲线取 15% 的轴向应变对应的应力为破坏应力；固结不排水试验取有效应力比峰值为破坏点。依据 4 个不同围压下的试验数据作莫尔圆，线性拟合出强度包线，获取对应的抗剪强度参数 c 、 φ 值。

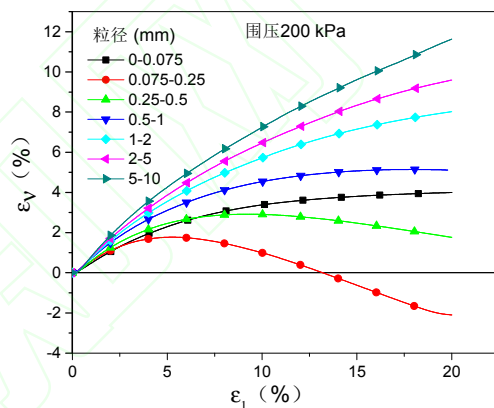
3 试验结果分析

3.1 强度变形特征分析

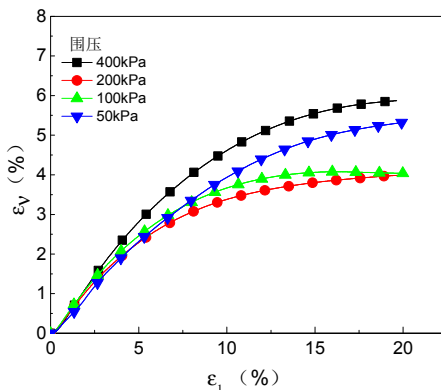
固结排水条件下不同粒径钙质土的应力-应变曲线如图 3 所示。本文以 200 kPa 围压为例进行分析讨论。从图 3(a)中可以看出：粒径小于 0.075 mm 的钙质粉土，其应力-应变曲线呈现出应变硬化的特征，在轴向应变较小时偏应力增长较快，随着应变增长，偏应力增长速度变慢；由体变-轴变关系曲线（图 3(b)）可知，钙质粉土体积随着轴向应变增长而缩小；对不同围压下钙质粉土的体变-轴变关系曲线（图 3(c)）进行对比分析，发现钙质粉土的体缩程度随着围压增长有所变大，但是增大幅度在 2% 以内，不同围压下体变在 3.9%~5.8% 之间，相比其他粒径钙质粉土体积变化对围压不敏感，表明了钙质粉土是一种弱剪胀性的土。粒径在 0.075~5 mm 范围内的钙质土，随着粒径变大，其应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型的过渡，当粒径增大到 5~10 mm 时，偏应力曲线在后期几乎全部表现为直线；与之相对应的体变曲线也逐渐由剪胀发展为剪缩，粒径增大到 2~5 mm 时，钙质土在 4 个围压下的体变曲线均未出现剪胀现象。粒径在 5~10 mm 的粗粒土，体变-轴向应变几乎表现为直线。



(a) 围压为 200 kPa 条件下的应力-应变曲线



(b) 围压为 200 kPa 条件下的体应变曲线

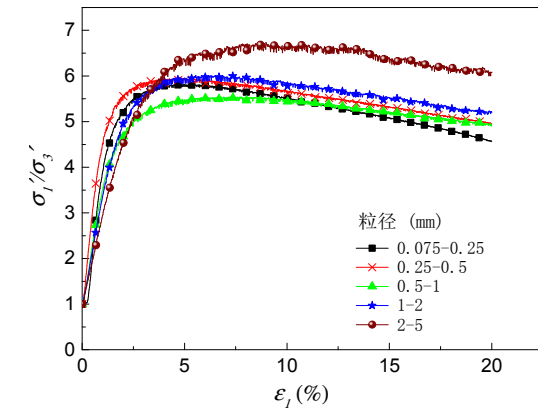


(c) 粒径小于 0.075 mm 的体变曲线

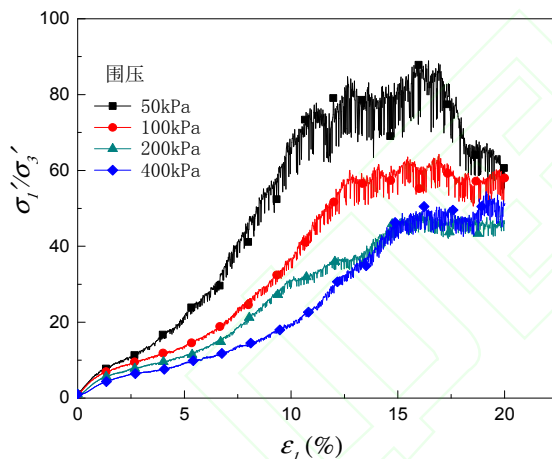
图 3 不同粒径钙质土 CD 试验曲线
Fig.3 CD test curves of calcareous soil with different particle sizes

固结不排水条件下不同粒径钙质土的试验曲线如图 4 所示，这里同样以初始围压为 200 kPa 为例。由于粒径小于 0.075 mm 的钙质粉土在试验过程中

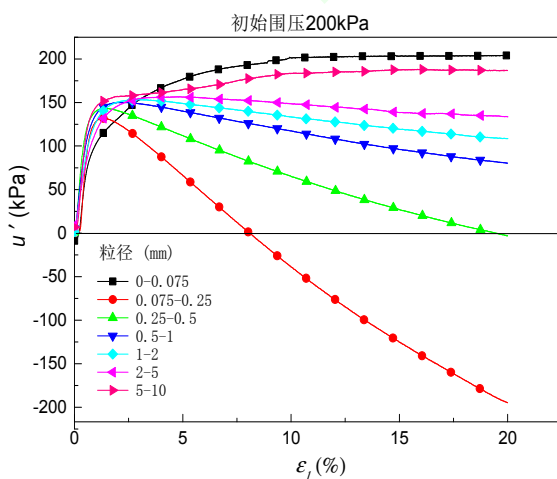
出现了液化现象,有效应力比异常,需要做进一步研究。此处仅对粒径在 0.075~10 mm 间钙质土的强度变形曲线进行对比分析。粒径在 0.075~5 mm 范围内的钙质土,有效应力比在应变较小时迅速增长,在很小的应变时即达到峰值,随着应变增长,有效应力比缓慢减小,最后都较为接近(图 4(a))。有效应力比峰值随粒径增加的变化不明显,表现得比较稳定。



(a) 各粒径钙质土三轴应力-应变曲线



(b) 5~10 mm 应力-应变曲线



(c) 孔压-轴变曲线

图 4 不同粒径钙质土 CU 试验曲线
Fig.4 CU test curves of calcareous soil

图 4(c)显示不排水条件下孔压发展规律,在较小轴向应变时钙质砂的孔压增长迅速,在较小轴向应变时即达到峰值,孔压峰值随着初始围压增加而增加,随着轴向应变增长孔压缓慢减小,最后孔压低于试验初始孔压(300 kPa),表现为实际上的负孔压。随着粒径增加,孔压在达到峰值以后降低的速率变缓。由于试验过程中施加 300 kPa 反压,因此粒径和围压较低时孔压接近甚至小于 300 kPa,有效孔压为负值,粒径和围压较大时有效孔压为正值。在粒径为 2~5 mm 时,在各围压下均表现为正孔压。这种规律与固结排水试验中的剪胀随粒径变化规律相似。当粒径增大到 5~10 mm 时,有效应力比-轴向应变关系曲线表现出与其他粒组不同,具体表现为,试验开始时有效应力比增长缓慢,随着应变增长,有效应力比增长速率增加,并出现比较大的波动(图 4(b)),这种波动现象主要是剪切过程中颗粒位置调整以及颗粒破碎造成的,在轴向应变变为 15%左右时有效应力比才达到峰值,并且有效应力比峰值比 0.075~5 mm 粒径的钙质土大得多。

3.2 抗剪强度参数分析

土的抗剪强度是滑动面上的法向应力的线性函数,即著名的库仑公式:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度 (kPa); σ 为滑动面上的正应力 (kPa); c 为土的黏聚力 (kPa); φ 为土的内摩擦角 ($^\circ$)。

土的抗剪强度分为两部分,一是颗粒间相对滑移所导致的摩擦分量,即土体具有与剪切面上的正应力成正比的抵抗剪切的能力;二是黏聚力分量 c ,它主要是颗粒间黏结力和土的结构性所产生。砂土是无黏性土,也无结构性,因此通常砂土的黏聚力被认为是 0。而在对钙质土的试验结果分析后发现,不论是直剪试验的 τ - σ 拟合曲线还是三轴试验中的摩尔圆模拟曲线,都存在显著而不可忽略的黏聚力 c 分量,因此在对钙质土的抗剪强度进行分析时,必须考虑黏聚力 c 对强度的贡献,对钙质土而言,黏聚力 c 主要来源于不规则颗粒间的咬合作用,而咬合力的大小与颗粒形状、粒径及应力水平有关(图 5)。

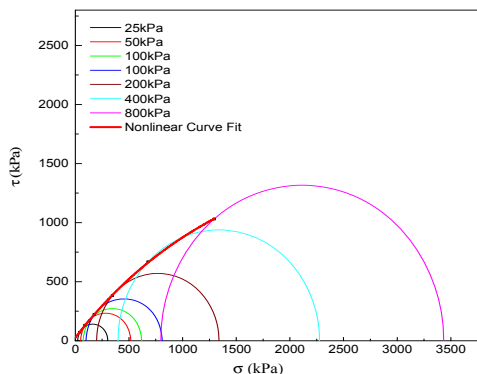
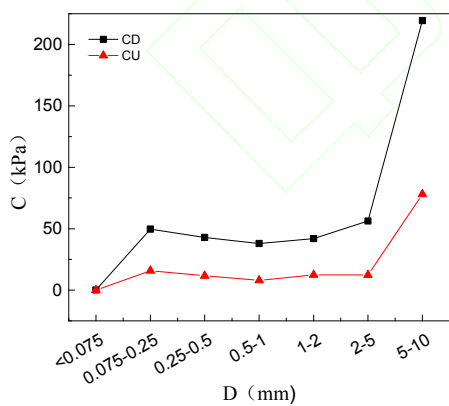
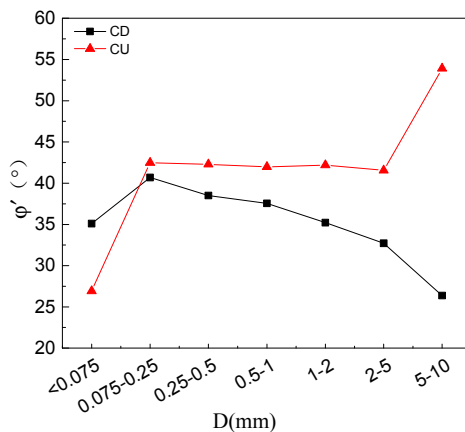


图 5 原始级配钙质土三轴强度拟合曲线
Fig.5 Strength fitting curve of calcareous soil

通过对三轴试验结果的分析后发现，钙质土的抗剪强度参数 c 、 ϕ' 值在小于 0.075 mm、0.075~5 mm、5~10 mm 三个粒径区间有明显不同的表现。粒径小于 0.075 mm 的钙质土在湿润状态下具有塑性，饱和时呈流塑状态，在干燥状态下较为坚硬，在形态上与散体砂粒不同，在力学性能上也具有与砂土截然不同的性质，其剪切变形机制是颗粒间的滑移，无咬合作用， c 也极小(图 6)。粒径小于 0.075 mm 的钙质土有效内摩擦角在固结排水试验中为 35.68° ，而在固结不排水试验中，低围压条件下容易发生液化，有效内摩擦角降低。可见，粒径小于 0.075 mm 的钙质土几乎不具有咬合力，即 c 几乎为 0。



(a)



(b)

图 6 不同粒径钙质土 CD/CU 试验的有效内摩擦角
Fig.6 Effective internal friction angle of CD/CU tests for calcareous soil with different particle sizes

当钙质土粒径在 0.075~5 mm 区间时，各粒组的应力-应变关系较为相似，抗剪强度指标随粒径变化规律表现得比较一致。这部分颗粒具有明显的不规则形状，剪切过程中呈现较大的 c 值，剪切变形机制是颗粒间的咬合、摩擦。如图 6 所示，排水条件下 c 值比不排水条件下大得多，固结排水条件下获得的 c 值在 38~56 kPa 之间，而固结不排水条件下获得的 c 值变化比较小，大约在 8~16 kPa。在固结排水条件下随着粒径增长有效内摩擦角呈减小的趋势，但是在固结不排水条件下有效内摩擦角变化较小。

当粒径在 5~10 mm 时，不排水条件下 ϕ' 突增，而排水条件下 ϕ' 骤减，这可以从两者的应力-应变关系得到解释。固结排水 (CD) 条件下，应力-应变曲线几乎呈线性，破坏时试样呈短柱状，试样的剪切是一个不断变密实的过程；固结不排水 (CU) 条件下有效应力比在增长过程中出现比较大的波动，表明剪切过程中土颗粒发生剧烈滚动和重排列，在颗粒重排列的过程中形成较大的咬合作用。

3.3 颗粒形状分析

吕海波等^[11]通过对 2 mm 以下的钙质土颗粒进行电镜扫描后发现，钙质土颗粒可分为 4 种典型的形状，分别为块状、纺锤状、片状和枝状。陈海洋等^[9]对钙质土颗粒的形状进行分析后，认为钙质土颗粒具有分型特征。根据他的研究认为，在不同粒径中钙质土颗粒的基本形状是相似的，但在不同粒组中，除了颗粒大小不同，每个粒组中不同形状颗粒的占比也有所不同。对 0.25~10 mm 的每个粒组，随机选取 100 个土颗粒进行形状统计，其结果见表 3。由于块状和纺锤状颗粒外形相似，在目视条件下

不易分辨，因此统计过程中将两者归为同一类。从图 7 可以看出，枝状颗粒有分叉，片状颗粒有尖锐棱角，因此，枝状与片状颗粒更容易形成颗粒间咬合。另外，枝状与片状颗粒某一维度尺寸与其他维度尺寸相差较大，因此，在受力时更容易破碎。从表 3 中不同形状颗粒含量随粒径变化的关系可以看到，大粒径钙质土，片状和枝状颗粒的数量和比例明显较大，在土颗粒之间极易形成咬合嵌固效应，在剪切过程中颗粒发生爬坡和剪胀效应，使抗剪强度明显提高。同时，片状与枝状颗粒受力后更容易破碎，因此随着粒径变小，片状与枝状颗粒含量逐渐减少。

表 3 钙质土不同颗粒形状的百分含量
Table 3 Percent of different shapes of calcareous soil particles

粒径/mm	不同颗粒形状的含量/%		
	片状	枝状	块状和纺锤状
5~10	18	16	66
2~5	33	10	57
1~2	11	5	84
0.5~1.0	8	0	92
0.25~0.50	9	0	91

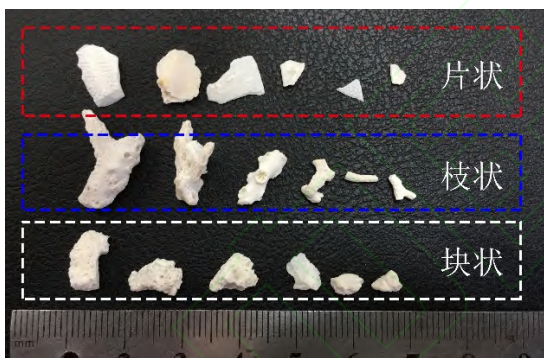


图 7 不同形状的钙质土颗粒
Fig.7 Different shapes of calcareous soil particles

4 强度讨论

根据 Lee 等^[12]提出的无黏性土抗剪强度理论，在不考虑黏聚力 c 分量的情况下，将无黏性土的内摩擦角 φ 分为 3 个分量，其表达式为

$$\varphi = \varphi_u + \varphi_d + \varphi_b \quad (2)$$

式中： φ 为总内摩擦角； φ_u 为滑动摩擦角，只与矿物成分有关，被认为是常量； φ_d 为由剪胀引起的摩擦角； φ_b 为由颗粒破碎和颗粒重排列引起的摩擦角。消除剪胀影响的内摩擦角 φ_f 的表达式为

$$\varphi_f = \varphi_u + \varphi_b \quad (3)$$

总内摩擦角 φ 、消除剪胀影响的内摩擦角 φ_f 可分别根据下列公式中内摩擦角与三轴试验的峰值主应力比关系计算得到：

$$\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_2}\right) = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}\right) \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}\right) \quad (5)$$

式中： σ'_1 为有效大主应力； σ'_3 为有效小主应力； $d\varepsilon_v$ 为体积应变增量（剪胀为正）； $d\varepsilon_1$ 为轴向应变增量。

将固结排水试验（CD）中不同粒组钙质砂的内摩擦角的计算值与实测值进行对比，并绘制有效内摩擦角 φ 的计算值、实测值以及消除剪胀影响的内摩擦角 φ_f 与粒径的关系曲线（如图 8 所示）。由图可知：当粒径小于 0.075 mm 时，内摩擦角计算值与实测值几乎相等，此时实测的黏聚力也几乎为 0；当粒径在 0.075~5 mm 范围内时，计算值与实测值随粒径的变化规律近乎一致，而计算值普遍比实测值大 $6^\circ \sim 8^\circ$ ；5~10 mm 粒组的内摩擦角计算值与实测值相差较大，该差值与 c 值随粒径的变化规律一致。笔者认为产生该差值的原因是 Lee 等提出的无黏性土的抗剪强度理论，只考虑摩擦作用对强度的影响，忽略了咬合作用的贡献，将内摩擦角作为唯一的抗剪强度指标，可见这一结果与实际相差较大，因此必须考虑咬合作用对强度的影响。

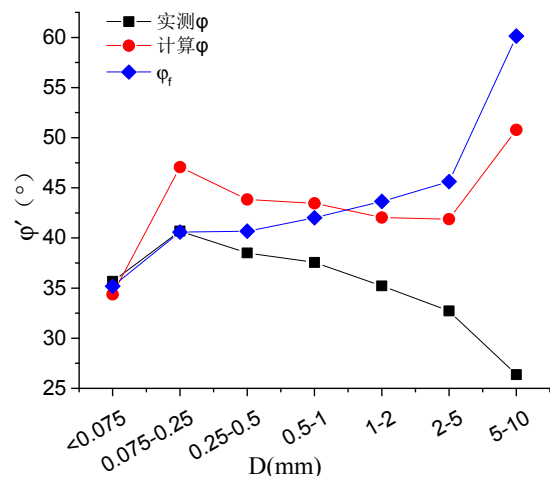


图 8 CD 试验中有效内摩擦角随粒径变化曲线
Fig.8 Friction angle of calcareous sand with different sizes in CD tests

本文在对试验数据的处理过程中，根据摩尔-库仑准则获得了 c 和 φ 两个强度指标，即认为抗剪强度由黏聚力 c （咬合作用）和摩擦作用 φ 两部分

组成，因此根据 Lee 等^[12]提出的计算公式计算获得的 ϕ 值较本文实测获取的 ϕ 值大，并且 c 值越大，两者的差值就越大。

将 ϕ_f 与计算获得的 ϕ 值对比发现，由于粒径小于 0.075 mm 的钙质粉土没有发生明显的剪胀，因此 ϕ_f 与 ϕ 值相差不大，对应的 c 值极小。当粒径大于 0.075 mm 时， ϕ_f 随着粒径增加而增大，这与 ϕ 值随粒径增加而减小的趋势正好相反。在 0.075~1 mm 粒径的钙质土中，剪胀起主导作用，剪胀提高了有效内摩擦角，但是随着粒径增加剪胀对强度的影响程度变小，自 1 mm 粒径以上，剪缩起主导作用，剪缩减小了有效内摩擦角计算值，随着粒径增加剪缩对强度的影响程度变大。

将不同粒径的钙质砂在 CD 试验中消除剪胀影响后的摩擦角 ϕ_f 与 CU 试验中的有效内摩擦角 ϕ' 的计算值和实测值相比较（如图 9 所示）。从图中可以看出：在 0.075~5 mm 粒径范围内，CD 试验中消除剪胀影响后的摩擦角 ϕ_f 与 CU 试验中的有效内摩擦角 ϕ' 随粒径变化规律一致，前者较 CU 试验中的有效内摩擦角计算值小 $2^\circ \sim 3^\circ$ 。在 0.075~5 mm 粒径范围内 ϕ_f 几乎与 CU 试验有效内摩擦角实测值相等，这个结果解释了图 6 中在 0.075~5 mm 粒径范围内的钙质土在排水剪切和不排水剪切过程中，有效内摩擦角随着粒径增加而差距增大的现象，这是因为在固结排水试验（CD）中随着粒径增长剪胀作用变小，甚至变成剪缩，使有效内摩擦角降低，而在固结不排水试验（CU）中剪胀通过改变孔压来体现，试样的体积并没有变化，并没有消耗外力额外做功，因此在固结不排水试验（CU）中有效内摩擦角随着粒径增长表现稳定。

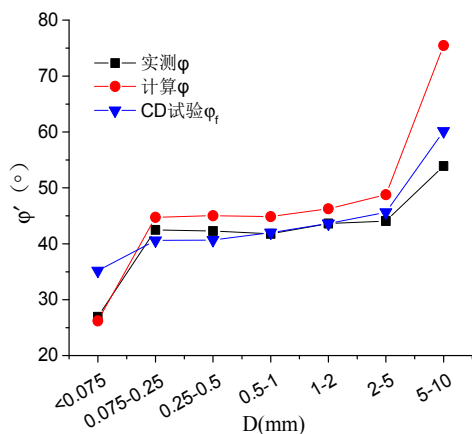


图 9 CD 试验消除剪胀后内摩擦角与 CU 试验有效内摩擦角对比图

Fig.9 Comparison of internal friction angle ϕ_f in CD tests and effective internal friction angle of CU tests

不同围压条件下，随着围压增长 ϕ 值不断减小，实际上表现出曲线形的强度包线。普通陆源土需要在极高围压下才能观察到曲线形强度包线，而钙质土在比较小的围压下即可表现出这种曲线关系。根据现行的三轴试验数据处理方法，采用直线拟合强度包线，这种方法一般在围压较低时不会引起大的误差，但是由于钙质土在低围压下即出现曲线形强度包线的特性，用直线拟合强度包线会在 Y 轴获得一个截距，该截距即是 c 值。钙质土在较低应力条件下即可发生颗粒破碎，即使在低至 25 kPa 围压下也发生破碎，并且破碎对围压极敏感。颗粒破碎一方面需要消耗额外的能量，使抗剪强度提高；另一方面颗粒破碎的结果却抑制了剪胀作用，导致了剪胀对强度增加的作用减弱。因此，颗粒破碎是造成钙质土有效内摩擦角随围压增加而减小的根本原因。在 ϕ' 减小的同时， c 值却不断增加，这表明颗粒破碎使抗剪强度中的摩擦分量逐渐减小，咬合力分量不断增加。 c 值与颗粒破碎之间必然存在相关性。因此，对相对破碎率与 c 值的关系进行统计分析，将每一个 c 值与其对应的 4 个围压下的颗粒总的相对破碎率进行统计，其结果如图 10 所示。由图可知， c 值与相对破碎率之间有很好的线性相关性。由于颗粒破碎必然是受到外力的作用， c 值与相对破碎率之间这种线性关系表明，颗粒间的咬合是造成颗粒破碎的前提条件。

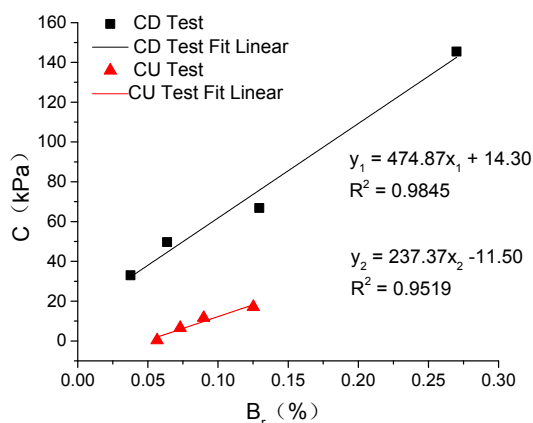


图 10 钙质土 c 值与相对破碎率关系
Fig.10 Relationship between cohesion and B_r

郭庆国^[4]在对粗颗粒土抗剪强度的研究中指出咬合力是克服剪胀变形所做之功，它随剪胀变形的产生而产生，受土体密度和法向应力影响。通过对比大量的峰值点强度与屈服点强度，在屈服点处 c

值几乎为 0, 因此峰值点强度是摩擦阻力和咬合力共同作用的结果, 而屈服点的强度由于咬合力尚未产生, 它主要是颗粒间摩擦阻力的作用结果。对 25~200 kPa 围压下的试样的屈服点强度指标、体应变为零点强度指标、峰值点强度指标、残余应变强度指标进行分析(表 4)。屈服点是试验前期试样由剪缩开始向剪胀转变的点, 此时剪胀率 $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}$, 屈服点对

应的应变随着围压增加而增加, 但是屈服点对应的偏应力还处于较低水平。体应变为 0 的点是当试样从前期剪缩转变为剪胀, 剪胀发展到试样体积与初始体积相等时的点, 此时试样孔隙比等于初始孔隙比, 对应的应变在低围压下较小, 但是高围压下对应的应变已经接近峰值点对应的应变, 此时应力水平较高。峰值点即是偏应力最大值点。残余 $\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} = 0$

应变点为偏应力达到峰值后降低至应力最低点时的应变, 此时试样已破坏。从表中看到, 屈服点应力、应变均较低的状态下 c 较低, 甚至接近 0。体应变为 0 时, 低围压下 c 值较低, 但是高围压下 c 值却很大。峰值点应力、应变均较大, 对应的 c 值也最大。残余应变时应变最大, 但是应力已大幅下降, 对应的 c 值也较低。以上分析说明, 钙质土 c 值不是应变控制, 而是应力控制。此外, 在钙质土的剪切试验中发现, 即使是在不排水试验中, 没有剪胀变形的情况下也可获得一个比较大的 c 值。在较高围压下, 试样全部发生剪缩的情况下获得的 c 值更大。因此虽然发生剪胀的状态下可获得较大的 c 值, 咬合力会更强, 但是剪胀不是咬合作用产生的根本原因。相反, 图 11 的模型说明是咬合作用的释放产生了剪胀。不规则的颗粒形状才是咬合作用产生的根本原因, 而应力水平才是决定咬合力大小的关键因素。

表 4 不同阶段钙质土的抗剪强度参数结果
Table 4 Strength parameters of calcareous soil in different stages

位置点	围压为 25、50、75、100 kPa		围压为 50、75、100、200 kPa	
	c / kPa	$\phi' / (^\circ)$	c / kPa	$\phi' / (^\circ)$
屈服点	0.42	46.51	3.60	45.54
体应变为零点	1.02	51.31	47.62	42.73
峰值点	29.87	47.34	48.55	44.10
残余应变	6.34	43.21	6.77	42.77

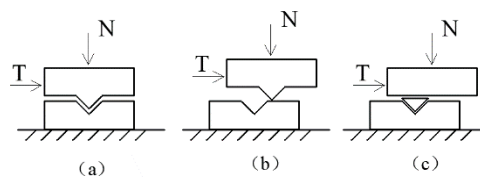


图 11 土的简单咬合模型
Fig.11 Occlusion model of soil

土力学中关于无黏性土 c 值产生机制的解释是 c 值是由颗粒的机械咬合作用产生, c 值是咬合力分量, 咬合力一部分体现在 c 值中, 一部分体现在 ϕ 值内。Lee 等发展的无黏性土抗剪强度理论将内摩擦角分为滑动摩擦分量、剪胀分量、颗粒破碎和重排列分量。由于咬合作用的释放在低围压下以剪胀的形式体现, 因此在低围压下咬合作用加剧了剪胀使内摩擦角提高, 但是咬合作用在 c 值上的分量却较低。在高围压下以颗粒破碎的形式体现, 颗粒破碎释放了剪应变空间, 抑制了剪胀作用, 因此, 内摩擦角的分量反而下降, 但是由于咬合力需要克服颗粒强度做功, c 值大幅增加。咬合与剪胀、颗粒破碎是伴随产生, 相互作用的, 咬合作用使钙质土的强度大幅提高。本文基于三轴试验对咬合作用进行了简单分析, 由于咬合作用是一种微观现象, 对咬合力的量化方面还需通过微观试验进一步研究。

5 结论

本文对不同粒径和不同排水条件下的钙质土进行了大量三轴试验, 分析了钙质土的强度和变形特性、抗剪强度参数、颗粒破碎及颗粒形状特征, 探讨了钙质土颗粒咬合作用的形成机制、表现形式以及对强度的影响。主要研究结论如下:

(1) 钙质土的抗剪强度必须考虑黏聚力 c 对强度的贡献, 黏聚力 c 源于不规则颗粒间的咬合作用, 而咬合力同时也是造成钙质土内摩擦角较高的部分原因, 咬合力的大小与颗粒形状、粒径及应力水平有关。

(2) 细颗粒的钙质砂即存在一定的咬合作用, 其原因是颗粒形状的不规则所引起; 随着粒径增大, 片状和枝状颗粒的数量和比例明显增大, 因此颗粒间更容易发生咬合嵌固而使其抗剪强度增加。

(3) 颗粒咬合与剪胀、颗粒破碎是伴随产生, 咬合作用使钙质土的强度大幅提高。在低围压下, 钙质土因颗粒咬合作用而产生剪胀, 提高有效内摩擦角; 在高围压下, 咬合力克服颗粒强度造成颗粒破碎, 颗粒破碎一方面抑制剪胀, 造成内摩擦角降

低, 另一方面又使黏聚力分量增加。

参考文献

- [1] 王新志, 王星, 翁贻令, 等. 钙质砂的干密度特征及其试验方法研究[J]. 岩土力学, 2016(增刊 2): 316—322.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, WENG Yi-ling, et al. Study on dry density characteristics of calcareous sand and its test method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016(Supp.2): 316—322.
- [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.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, LIU Hai-feng, et al. Study on the engineering behaviors of coral reef ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 2065—2070.
- [3] 陈希哲. 粗粒土的强度与咬合力的试验研究[J]. 工程力学, 1994, (4): 56—63.
CHEN Xi-zhe. Reserch on the strength of coarse grained soil and the interlocking force[J]. **Engineering Mechanics**, 1994, (4): 56—63.
- [4] 郭庆国. 关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 1987, (5): 59—65.
GUO Qing-guo. Experimental study on shear strength properties of coarse-grained soil[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1987, (5): 59—65.
- [5] SHINOHARA K, OIDA M, GOLMAN B. Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test[J]. **Powder Technology**, 2000, 107(1): 131—136.
- [6] GUO P, SU X. Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 44(5): 579—591.
- [7] 蒋明镜, 李秀梅, 孙渝刚, 等. 考虑颗粒抗转动的砂土双轴试验离散元模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 514—517.
JIANG Ming-jing, LI Xiu-mei, SUN Yu-gang, et al. Discrete element simulation of biaxial compression test considering rolling resistance[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009(Supp.2): 514—517.
- [8] 刘崇权, 杨志强, 汪稔. 钙质土力学性质研究现状与进展[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 74—84.
LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. Research status and progress of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(4): 74—84.
- [9] 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 Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1289—1392.
- [10] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043—2048.
ZHANG Jia-ming, JIANG Guo-sheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2043—2048.
- [11] 吕海波, 汪稔. 钙质土破碎原因的细观分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 890—892.
LÜ Hai-bo, WANG Ren, KONG Ling-wei. Preliminary mesoscopic analysis on factors of breakage in calcareous soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.1): 890—892.
- [12] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 4(1): 68—86.