

# 颗粒破碎对钙质砂变形及 强度特性的影响\*

吴京平 褚瑶 楼志刚  
(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘 要 利用人工钙质砂和三轴剪切试验手段, 就颗粒破碎及其对钙质砂变形和强度特性的影响进行分析研究。结果表明, 颗粒破碎程度与对其输入的塑性功密切相关; 颗粒破碎的发生使钙质砂剪胀性减小, 体积收缩应变增大, 峰值强度降低。

关键词 钙质砂, 颗粒破碎, 变形特性, 强度特性。 抗剪强度,

## 1 引言

钙质砂是指富含碳酸钙颗粒或天然胶结物的碳酸盐沉积, 多分布于北纬 30° 和南纬 30° 之间的、属热带或亚热带气候的大陆架及海岸线一带。它是因长期在饱和的碳酸钙溶液中, 经物理、生物化学及化学作用过程(其中包括有机质碎屑及岩屑的破碎和胶结过程), 以及一定的压力、温度和溶解度的变化过程, 而形成的一种与陆相沉积有很大差异的碳酸盐沉积, 其主要矿物成分为碳酸钙。钙质砂的颗粒有 4 种: ①骨架式颗粒, 是由海洋有机物形成, 这是钙质土颗粒的主要来源; ②球形颗粒, 是一些实心的卵状或球状细粒, 本身结构性很弱; ③包粒, 是经无机化学沉淀而形成的具有碳酸钙同心层或包裹层的沉积颗粒; ④碎屑颗粒, 是从其他沉积物或岩石中分化而来的碎片。这些不同形状、不同强度的颗粒组成了钙质砂的结构骨架。由于钙质砂特殊的成因和组成, 物理力学性质与其他类型的沉积物相比有较大的差异<sup>[1-3]</sup>。

经对已有研究成果的分析, 并考虑到钙质砂特殊的生物成因和颗粒组成, 笔者认为颗粒破碎是影响钙质土变形及强度特性的主要因素。本文利用人工备制的钙质砂和三轴剪切试验手段, 对钙质砂的颗粒破碎与塑性功之间的关系、颗粒破碎特性及其对变形与强度的影响机理进行分析研究。

## 2 试验介绍

### 2.1 试样的制备

鉴于以下原因: ①不可能从海底取样获得足够的天然钙质砂; ②人工配制试样均匀性和试验重复性好; ③碳酸钙含量易控制。本次试验采用人工配制的钙质砂。

经反复摸索试验, 用天然贝壳经人工粉碎和酸化腐蚀后, 并控制干密度和颗粒级配以模拟海洋环境中的天然钙质砂。本次试验所用人工钙质砂的基本物理性质指标和颗粒分布曲线见表 1 和图 1。为便于比较, 试验还分别选用了河北平山石英砂和我国南沙的钙质砂, 并与人钙

\* 中国科学院“八五”重大项目资助课题(No. KY85-11)。

到稿日期: 1996-04-01。

质砂相同的颗粒级配备制样品。

表1 土样的基本物性指标

物性指标	$G_s$	$D_{10}$ (mm)	$e_{max}$	$e_{min}$	CaCO <sub>3</sub> (%)
人工钙质砂	2.82	0.16	1.22	0.68	99
石英砂	2.66	0.16	1.14	0.64	-

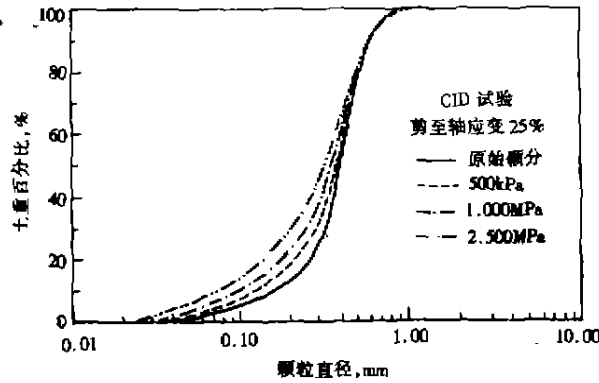


图1 受力前后粒径的变化情况

## 2.2 试验步骤

试验在WF应变控制式高压静三轴仪上进行,试验过程中主要量测轴向荷载、轴向位移、孔隙水压力和试样的体积变化,其数据采集和处理由计算机进行。

试样直径为39.1mm,高80mm。称取所需重量的烘干砂样,分三等分依次装入橡皮模中并使之填至要求高度,在利用排水管水头从试样底部缓缓注水饱和后,用200kPa的反压进行饱和,直至试样排水固结前其孔隙水压力系数 $B$ 值达95%以上。试样固结为等向固结,压力室围压在固结和剪切过程中保持不变。轴向剪切应变速率为0.1mm/min,最大轴向应变为25%。

试验类型包括等向固结试验、等向固结排水剪切试验和等向固结不排水剪切试验。等向固结试验主要是了解压缩和回弹特性及因固结而引起的土颗粒的破碎情况。

试验前和固结或剪切后,对每个试样分别进行筛分,以了解试验前后土颗粒粒径的变化,掌握颗粒破碎的发展状况。

## 2.3 人工钙质砂与天然钙质砂的比较

表2汇总了部分天然钙质砂的基本土性指标,同时也相应列出了本次试验所用人工钙质砂的指标。可以看到,人工钙质砂的基本土性指标与天然钙质砂指标的变化范围基本相符或相近。图2为人工钙质砂与我国南沙天然钙质砂的三轴固结排水剪切试验中主应力差和体积应变随轴向应变发展过程的比较曲线,其主应力差和体积应变的发展与天然钙质砂是非常接近的。由此可见本试验所用人工钙质砂可以满足模拟钙质砂特性的要求,为方便起见,除特殊情况外,本文将之简称为钙质砂。

表2 与天然钙质砂的比较

土性指标	CaCO <sub>3</sub> (%)	$G_s$	$e_{min}$	$e_{max}$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi_{\sigma'}$ (°)
人工钙质砂	99	2.82	0.68	1.22	16.30	38
天然钙质砂	88~96	2.72~2.81	0.51~1.62	0.84~1.98	14.81~17.85	-36

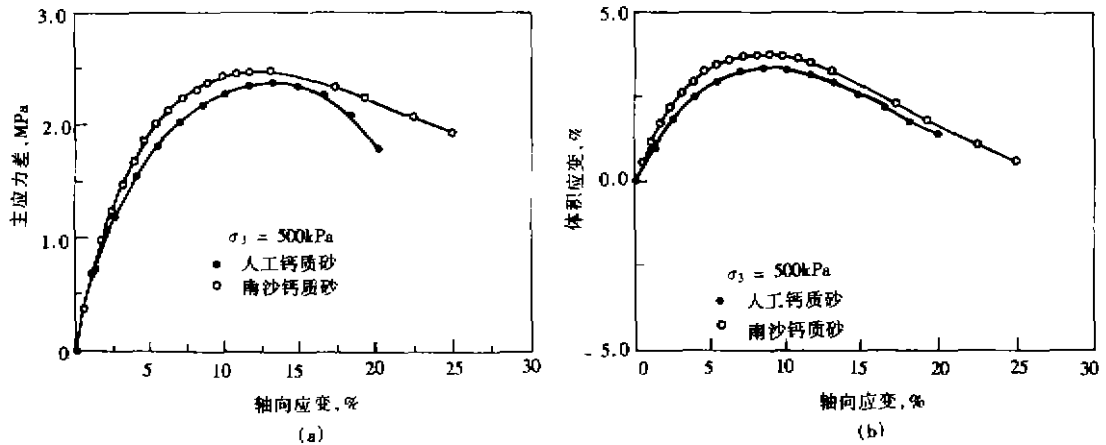


图2 人工钙质砂与天然钙质砂的比较

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 峰值强度和极限强度

图3为实测的莫尔包线。因存在较高矿物摩阻及角状颗粒间的咬合作用,钙质砂具有很高的峰值强度,围压为100kPa时,其峰值摩擦角高达 $51^\circ$ 。在试验应力范围内,钙质砂具有明显的呈下弯状的莫尔包线,说明在三轴试验应力条件下钙质砂的峰值强度随围压的增加而显著降低。

在大应变条件下,土样体积不进一步变化,剪应力保持常数,即进入临界状态。图4为钙质砂等向固结排水剪切试验中有效应力比与剪胀性之间的关系。图中纵坐标为有效应力比 $q'/p'$ ,横坐标为土样的体积剪胀速率 $d\epsilon_v/d\epsilon_s$ , $\epsilon_s = \epsilon_1 - \epsilon_v/3$ 为与 $q'$ 相适应的剪切应变, $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_v$ 分别为轴向应变与体积应变。该图表明,在小围压下(如100kPa),土样因剪切膨胀应力比具有明显的峰值,然后随应变增加逐渐进入临界状态;当围压较大时(1000kPa),应力比单调增加而直接进入临界状态。对普通石英砂两者具有下述关系<sup>[3]</sup>:

$$\frac{q'}{p'} = M - \alpha \left( \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_s} \right) \quad (1)$$

这里 $M$ 是临界状态下的应力比 $q'/p'$ ;  $\alpha$ 为一常数。本次试验结果表明钙质砂的应力比与剪胀速率间也满足式(1),其中 $M = 1.72$ ,  $\alpha = 0.72$ 。另外,就试验所提供的应力范围而言,无论围压高低,各试样在 $d\epsilon_v/d\epsilon_s = 0$ 处的应力比 $q'/p'$ 大致通过相同的一点,表明应力水平的高低不会直接明显地影响钙质砂临界状态下的极限偏差角。

#### 3.2 颗粒破碎现象及其描述

图1为三轴剪切试验剪切过程前后钙质砂颗粒分布曲线的变化情况,它表明土样在受剪过程中颗粒产生破碎,粒径发生明显的变化。这是因为与具有滚圆状颗粒的石英砂相比,具有角状颗粒的钙质砂的每一颗粒与相邻颗粒的接触点及接触面积少,在应力作用下颗粒所受应力增大,加之颗粒本身强度低,从而产生明显的颗粒破碎。本文拟采用Hardin<sup>[4]</sup>的方法对钙质砂的颗粒破碎作定量描述。Hardin以筛分曲线上粒径变化一个量级所围面积作为单位面积,视原始筛分曲线与粒径 $D = 0.074$ 竖线(认为粉粒以下的细颗粒对颗粒破碎的影响不大)所围面积为初始破碎势 $B_{p0}$ ,受力破碎后所围面积为破碎势 $B_{pi}$ ,则破碎量 $B_i$ 为上述两面积的差值,即

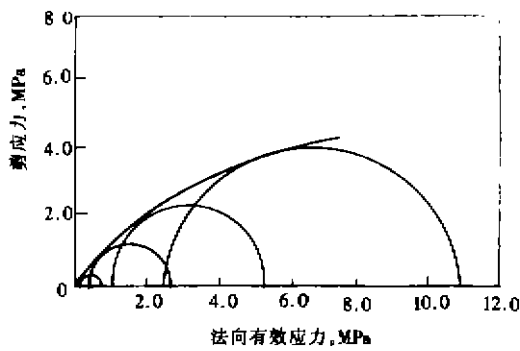


图3 莫尔包线图

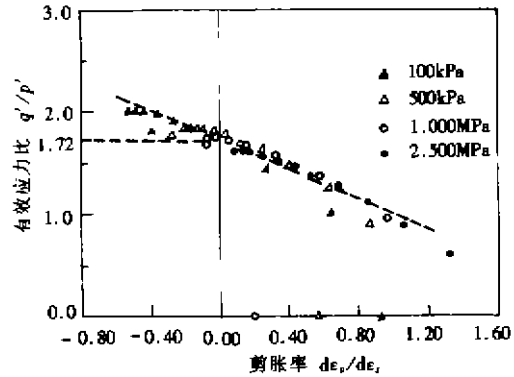


图4 有效应力比与剪胀率间的关系

$$B_t = B_{p0} - B_{pi} \tag{2}$$

而相对破碎度则为

$$B_r = B_t / B_{p0} \tag{3}$$

该法引入破碎势概念,物理意义明确,能了解颗粒破碎的全貌,测定和计算简便,并可利用相对破碎度对不同初始粒径试样的破碎进行比较研究。

### 3.3 颗粒破碎与塑性功

经典的粉粒体破碎理论认为材料破碎与其输入的能量有关。笔者认为,在三轴试验应力条件下,对某一给定的试样,其颗粒破碎主要是由剪应力  $q'$  及正应力  $p'$  与其相应的应变组合来控制。下面将就试样受力过程中的颗粒破碎与其所吸收能量的关系进行探讨。

三轴剪切应力条件下试样的有效主应力为  $\sigma_1', \sigma_3' (= \sigma_2')$ ; 主应变增量为  $\delta\epsilon_1, \delta\epsilon_3 (= \delta\epsilon_2)$ ; 体积应变增量为  $\delta\epsilon_v$ , 则能量的变化量为

$$\delta E' = \sigma_1' \cdot \delta\epsilon_1 + 2\sigma_3' \cdot \delta\epsilon_3 = q' \cdot \delta\epsilon_s + p' \cdot \delta\epsilon_v \tag{4}$$

其中  $q' = \sigma_1' - \sigma_3'$ ;  $p' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ ;  $\delta\epsilon_s = \delta\epsilon_1 - \delta\epsilon_v/3$ ;  $\delta\epsilon_v = \delta\epsilon_1 + 2 \cdot \delta\epsilon_3$ 。

上述能量变化  $\delta E'$  由可恢复部分  $(\delta E')_e$  和不可恢复部分  $(\delta E')_s$  两部分组成,即

$$\delta E' = (\delta E')_e + (\delta E')_s = (p' \cdot \delta\epsilon_v)_e + (q' \cdot \delta\epsilon_s + p' \cdot \delta\epsilon_v)_s \tag{5}$$

这里假设偏应力  $q'$  引起的可恢复部分能量为零,即

$$(q' \cdot \delta\epsilon_s)_e = 0 \tag{6}$$

考虑到颗粒破碎为不可逆现象,所以与颗粒破碎相关的三轴压缩剪切试验过程中的塑性功

$$W_p = \int (\delta E')_s = \int q' \cdot \delta\epsilon_s + \int p' \cdot \delta\epsilon_v - \int p' \cdot \delta\epsilon_{ve} \tag{7}$$

上式所述塑性功即为等向固结或剪切过程中正应力  $p'$  与体积应变及偏应力  $q'$  与剪切应变  $\epsilon_s$  曲线所围的面积之和。经对典型试样进行的三轴剪切试验结果表明,由于钙质砂三轴等向卸荷曲线的斜率  $\kappa$  值很小,故由平均正应力  $p'$  产生的能量的可恢复部分仅为全部塑性功的很小部分,因此,本试验研究在塑性功的实际计算中忽略了这部分能量。

图5为试样在受力过程(等向固结及剪切过程)中所吸收的塑性功与相应的颗粒相对破碎度在双对数坐标下的关系图。为就剪切过程中的颗粒破碎进行分析讨论,现将三轴试验的固结和剪切阶段分别考虑,图5中三轴剪切试验的塑性功并未包括土样固结阶段所吸收的塑性

功。该图表明,在三轴试验应力条件下,钙质砂的颗粒破碎与其受力过程中所吸收的塑性功密切相关,无论试验方法(等向固结或剪切)、试验条件(轴向应变、应力比或围压)及应力路径(排水或不排水剪切)如何,两者大体具有唯一的关系,即

$$B_r = \alpha \cdot (W_p)^\beta \quad (8)$$

$\alpha, \beta$  为与土性有关的试验常数。在本试验研究中  $\alpha = 0.0017, \beta = 0.58$ 。

在本研究的开始阶段,笔者认为由于应力条件和破碎机理的不同,剪切过程中的颗粒破碎量会显著大于等向固结过程的破碎量。现从能量角度分析,可以认为这是因为试样在剪切过程中吸收的塑性功明显大于等向固结过程所吸收的塑性功的缘故。

### 3.4 颗粒破碎对变形及强度的影响

土颗粒的破碎势必对粒间的间隙进行填充,从而直接对土的体积变化特性产生影响,而据式(1)可知,剪切过程中体积变化特性的变化又会影响土强度的发挥。为了解颗粒破碎对钙质砂体积应变的影响程度,在下述条件下与石英砂进行对比试验:①钙质砂与石英砂的级配相同;②两者的相对密度相同。并假设:①在试验的应力范围内,石英砂无颗粒破碎或破碎很小可以忽略;②根据 Koerner<sup>[5]</sup>对级配相同、颗粒形状不同的石英砂的研究结果,认为颗粒形状本身不影响试样的剪胀效应。

于是,可以认为图 6 中竖线阴影部分即为颗粒破碎引起的体积应变。图 7 横坐标为钙质砂剪至峰值处的相对破碎度  $B_r$ ,纵坐标为钙质砂相应的体积应变  $\epsilon_{vc}$  与石英砂体积应变  $\epsilon_{vq}$  的相对差值  $\Delta\epsilon_v (= \epsilon_{vc} - \epsilon_{vq})$ ,即为剪切过程中因钙质砂的颗粒破碎引起的体积应变的大小。它表明随破碎程度的加大,颗粒破碎本身引起的体积应变不断增加,两者大体成直线关系。值得注意的是,当该图的横轴  $B_r = 0$  时,纵轴仍有约为 2% 的初始截距,对此试作如下解释:三轴剪切开始后,在较小的剪切应变下试样在剪应力的作用下颗粒尚未产生破碎或破碎很小,只是因

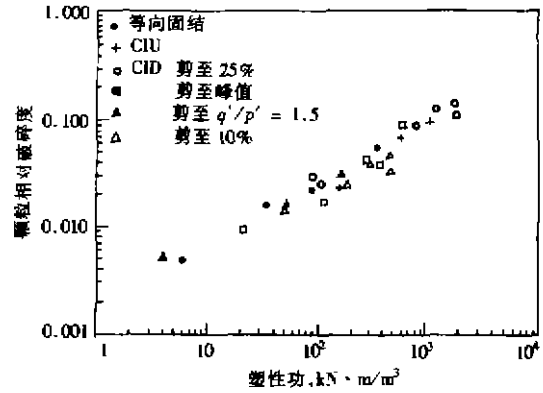


图 5 塑性功与颗粒相对破碎度的关系

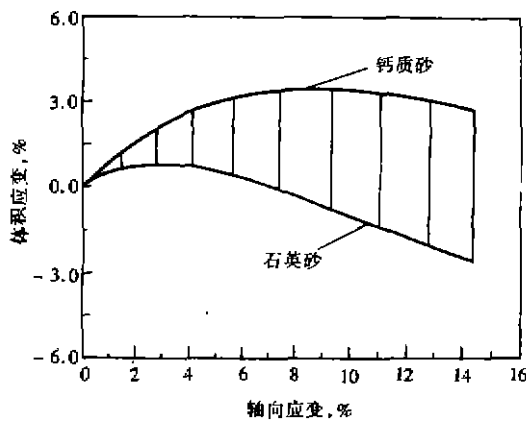


图 6 体积应变差值示意图

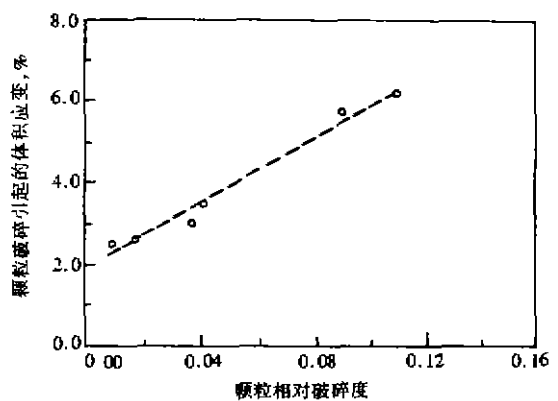


图 7 颗粒破碎引起的体积应变与颗粒相对破碎度的关系

颗粒的重新排列而引起体积收缩,由于钙质砂颗粒的棱角明显大于颗粒比较光滑的石英砂,从而使其这部分的体积应变要大于石英砂。如果这种解释正确,那么可以说剪切过程中钙质砂显现的较大的体积应变主要来自两方面:一是由颗粒形状本身引起的体积应变,另一方面是由颗粒破碎的发生及发展引起的体积应变。以本次试验结果为例,前者约比石英砂大2%,后者则随破碎而发展,当  $B_r = 0.1$  时,其大小约为4%。

Rowe 剪切理论认为,粒状土的抗剪强度由三个分量组成,即滑动摩擦、颗粒的排列和定向以及土样的剪胀。而对紧砂而言,其峰值强度的变化对剪胀性起主要作用。图8为峰值点处应力比剪胀分量  $\Delta(q'/p')_d$  与应力  $p'$  的关系,它表明在较低的应力范围内,虽然钙质砂的峰值强度与石英砂的不同,然而其剪胀分量基本相同;在随后较高的一段应力范围内( $p' = 250 \sim 2500 \text{kPa}$ ),因钙质砂产生明显的颗粒破碎,体变特性由剪胀向剪缩方向发展,土样剪胀性降低,从而使相同应力下的应

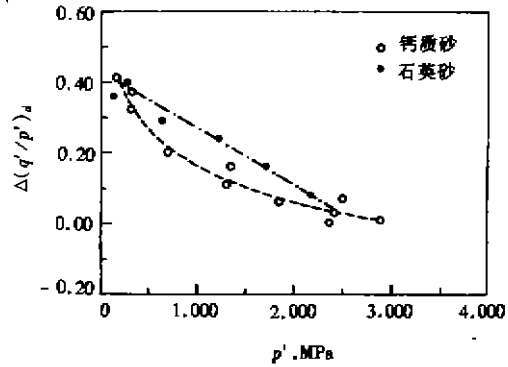


图8 应力比剪胀分量  $p'$  变化关系图

力比的剪胀分量小于石英砂;在这之后,两者的剪胀分量又趋一致,逐渐进入临界状态。也就是说,颗粒破碎引起的附加的剪胀性降低将直接影响钙质砂的峰值强度。

图9为试样破坏时(峰值点)颗粒相对破碎度  $B_r$  与相应剪胀率  $d\epsilon_v/d\epsilon_s$  及有效应力比  $q'/p'$  的关系图,它表明随颗粒破碎的发生和发展,试样的剪胀率与有效应力比之间具有很好的对应关系。根据试验结果,钙质砂破坏时的有效应力比及剪胀率与颗粒相对破碎度之间有如下的关系:

$$q'/p' = a - b \cdot \log(B_r) \tag{9}$$

$$d\epsilon_v/d\epsilon_s = c + d \cdot \log(B_r) \tag{10}$$

也就是说,颗粒破碎使土样的体积收缩应变增大,并较早地进入剪切收缩阶段,从而通过剪胀率的减小导致抗剪强度发挥的降低,在图3中则表现为莫尔包线呈弯曲状,即峰值摩擦角不断减小。

图10为塑性功与剪胀率及有效应力比的实测关系,由式(8)~(10)可以推得有效应力比及剪胀率与塑性功间也有类似的关系,即

$$q'/p' = a' - b' \cdot \log(W_p) \tag{11}$$

$$d\epsilon_v/d\epsilon_s = c' + d' \cdot \log(W_p) \tag{12}$$

其中  $a, b, c, d$  和  $a', b', c', d'$  均为与土样有关的试验常数。

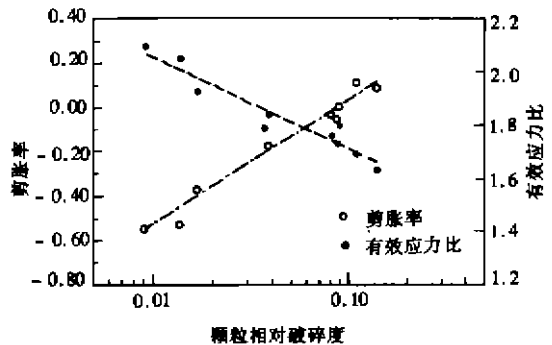


图9 颗粒相对破碎度与剪胀率及有效应力比的关系

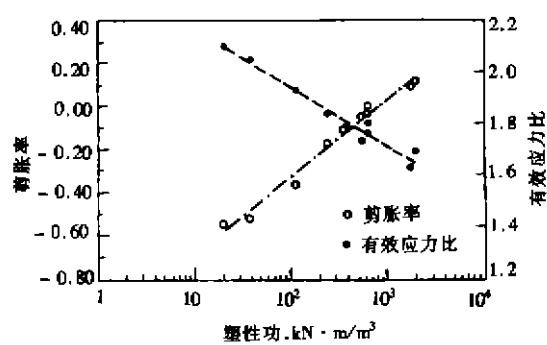


图10 塑性功与剪胀率及有效应力比的关系

## 4 结 论

在所提供的试验方法和试验条件下,对人工钙质砂进行的试验分析结果表明:

(1)用人工备制的钙质砂可模拟天然钙质砂的主要物理力学特性。

(2)钙质砂含有大量的角状颗粒及相应的粒间孔隙,其摩擦角高于石英砂。在试验的应力范围内,钙质砂峰值强度随应力的增加而降低,莫尔包线呈弯曲状,而临界状态下的极限强度基本不变。在三轴剪切试验过程中,钙质砂具有较大的体积应变,它主要由特殊的颗粒形状本身和颗粒破碎引起,而颗粒破碎引起的体积应变与颗粒相对破碎度呈递增的直线关系。

(3)在三轴等向固结和剪切试验过程中,钙质砂均具有明显的颗粒破碎现象,破碎程度与受力过程中所吸收的塑性功大小密切相关,在利用所述方法对颗粒破碎做定量描述的条件下,其颗粒相对破碎度与塑性功之间有式(8)的关系。颗粒破碎将使钙质砂的体积收缩应变增大,较早地进入剪切收缩阶段,导致剪胀率和相应抗剪强度发挥的降低。试样破坏时的颗粒相对破碎度及所吸收的塑性功与剪胀率和有效应力比之间有式(9)~(12)的对应关系。

### 参 考 文 献

- 1 Semple R. State of the Art Report on Engineering Properties of Carbonate Soils. Proc Int Conf on Calcareous Sediments, Perth, Australia. 1988, 2:807~836.
- 2 Coop M R. The Mechanics of Uncemented Carbonate Sands. Geotechnique, 1990, 40(4):607~626.
- 3 Datta M, Gulhati S K, Rao G V. Crushing of Calcareous Sands during Shear. 1979, OTC 3525.
- 4 Hardin B O. Crushing of Soil Particles. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10):1177~1192.
- 5 Koerner R M. Effect of Particle Characteristics on Soil Strength. Journal of Geotechnical Engineering, 1970;96(SM4): 1221~1234.

## Influence of Particle Breakage on Deformation and Strength Properties of Calcareous Sands

Wu Jingping    Chu Yao    Lou Zhigang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract** The influence of particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands was investigated using artificial calcareous sands and triaxial testing. The results indicate that particle breakage depends on the sample's plastic work received during testing, and reduces the volume expansion and peak strength of the sands.

**Key words** calcareous sands, particle breakage, deformation properties, strength properties.