

# 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题<sup>\*</sup>

刘崇权 汪 稔

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

吴新生

(深圳市龙岗房地产开发公司 深圳 518000)

**摘要** 钙质砂微观结构和变形机理与陆源砂不同,需采用适用于其特征的试验技术。对钙质砂的土粒比重、孔隙比的测量方法、三轴剪切制样技术、颗粒破碎的评价及强度取值方法进行了探讨。

**关键词** 钙质砂,物理力学性质试验

**分类号** TU411.3

## 1 前言

钙质砂是一种含  $\text{CaCO}_3$  达 50% 以上的海洋生物成因的特殊土。钙质砂从微观结构上看,棱角度高,粒间孔隙度大,有内孔隙,这些内孔隙或相互贯通,或成为盲孔,使常规试样饱和技术很难达到 95% 以上的饱和度。又由于矿物硬度低,颗粒粗糙度大,使试样在加载剪切过程中,颗粒破碎与剪胀耦合作用,表现出特殊的应力-应变关系及强度特征。为了对其物理力学性质进行详细的研究,必须有一整套适用于其特性的试验技术。本文对钙质砂的土粒比重、孔隙比的测量方法、三轴剪切制样技术、颗粒破碎的评价及强度取值方法进行了探讨。

## 2 物理性质试验

### 2.1 土粒比重

通常测试土粒比重的方法有比重瓶法、浮称法、虹吸筒法。《土工试验方法标准》(GBJ12388)规定:粒径  $< 5.0 \text{ mm}$  的土采用比重瓶法;粒径  $\geq 5.00 \text{ mm}$  的土,其中  $> 20 \text{ mm}$  的颗粒含量  $< 10\%$  时,采用浮称法;粒径  $\geq 5.0 \text{ mm}$  的土,其中粒径为  $20 \text{ mm}$  的土的含量  $\geq$  总土质量的  $10\%$  时,采用虹吸筒法。表 1 是各种方法测得钙质砂的土粒比重。

当颗粒粒径较大时,在比重瓶法中,制样过程中需经砂浴煮沸,并用真空抽气法排气,这有利于液体浸入颗粒内孔隙。而在浮称法和虹吸筒法中则只是

表 1 土粒比重测试统计表

Table 1 Statics table of measured grain gravity ratio

测试方法	比重 $G_s / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	
比重瓶法	纯水作液体	2.80
	煤油作液体	2.73
浮称法		2.53 ~ 2.71
虹吸筒法		2.25 ~ 2.33

浸水一昼夜。其内孔隙在无压力条件下液体很难浸入,这导致测得的土粒排水体积偏大,  $G_s$  值偏低。

由于颗粒表面含有易溶盐,用纯水作液体时,盐类全部或部分溶于水中,使瓶、水、土总质量增大,因而引起所测  $G_s$  值偏大。而煤油作液体时可避免这种情形。

为了进一步验证测试  $G_s$  值的可靠性,用上述两种方法测得的  $G_s$  值计算孔隙比与实测孔隙比进行对比,如表 2 所列。

从表 2 中可看出,  $G_s = 2.73$  时,实测值与计算值较为吻合。故在测量土粒比重时,一般推荐采用煤油作液体的比重瓶法,通常可取  $G_s = 2.73$  作经验值。

### 2.2 相对密度

现行国家规范中用振动与锤击联合使用的方法测试最大、最小孔隙比,进而得到土的相对密度。但由于钙质砂易碎,锤击过程中会改变颗粒级配,使测试结果失真。因此,在测试过程中只用振动叉振动,直至体积不再改变为止。试验测得钙质砂孔隙比为 0.82.97 之间,这显然比普通石英砂的值高了许多。

1998年5月12日收到初稿,1998年7月15日收到修改稿。

\* “九五”国家科技攻关项目(97-926-03-02)。

作者 刘崇权 简介:男,27岁,1994年毕业于中国地质大学水文地质与工程地质系岩土工程专业,现为博士生,主要从事特殊土土力学、海洋土力学方面的研究工作。

表 2 孔隙比实测值与计算值比较

Table 2 Comparison of measured and calculated pore ratio

实测 $e$	计 算 孔 隙 比			
	$G_s = 2.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	误差 / %	$G_s = 2.73 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	误差 / %
1.162	1.32	13.6	1.26	8.4
1.014	1.305	28.7	1.247	22.9
1.08	1.283	18.8	1.177	8.98
1.221	1.258	3.0	1.202	-1.56
1.213	1.31	8.0	1.252	3.2
1.20	1.31	9.2	1.254	4.5
1.117	1.352	21.0	1.293	15.8
1.231	1.304	5.9	1.247	1.3
1.212	1.318	8.7	1.260	4.0

注：本表中孔隙比的实测值为三轴试验试样饱和度达 95% 以上后，根据试样排水量及烘干后失水量算出。

### 3 力学性质试验

通常的力学试验中，一般做单轴压缩、直剪、三轴排水剪等试验。

对力学性质试验而言，最重要的是三轴剪切过程中的制样和饱和。通过试验，采用干砂制样，再辅以多种饱和方法联合饱和，使备样、饱和过程可在 46 h 完成，且饱和度都达 95% 以上。其主要过程为：先用二氧化碳冲洗底座，在底座上放置透水石和滤纸一层，然后，装上击实筒和橡皮膜（视有效围压大小使用一层或多层橡皮膜），将干砂撒在三轴试样制样筒内，用木柄轻按砂面，同时，在击实筒外敲击振动，直至要求的干密度。放入滤纸和透水石装上试样帽，扎紧橡皮膜。试样加一小的负压，以维持试样直立，小心拆去击实筒，按国标要求测量试样直径和高度。若需加 2 个以上橡皮膜，则在测量直径前不装试样帽，仅在透水石上扎紧第一层橡皮膜，再将第二层橡皮膜装在承膜筒上，小心地套在试样外。然后重新套上击实筒，以保护试样，减少扰动，最后装上试样帽，重新施加负压使其直立。

装上压力室，向室内充水至满，利用加压装置施加很小的围压，一般为 1020 kPa，将高压钢瓶中的二氧化碳经过两级减压（纯度 99% 以上）至 210 kPa，经试样底座中心小孔通入试样，再从排水管顶端溢出，其目的是用二氧化碳置换试样中的空气，时间为 15 min，然后关闭进气阀，二氧化碳冲洗完毕。打开进水阀，让水从试样底部中心孔进入样中，进行水头饱和，时间为 3045 min。经测定，这两个阶段以后，试样  $B$  值（孔隙水压力系数）只有 0.60.8，远不能达到试验要求。其后施加反压饱和，则可使试样饱和度达 98% 以上。反压采取分级施加。在此过程中，保持围压大于反压 20 kPa 以上，以防止试样可能因膨胀而破坏结构。且该差值在施加反力过程中

保持常数，每级反压力取 50 kPa，施加时逐级缓慢施加，在施加反力时不允许试样体积变化或出现附加有效应力，每一级压力需待试样内孔压充分均匀后再施加下一级反压。孔压稳定标准采用孔压消散为零，且水不再流入试样中为止。反压约 10 min 一级。

每级反压施加后，测  $B$  值， $B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$ ，（ $\Delta u$  为施加反压后的孔隙水压力增量， $\Delta \sigma_3$  为本级施加的反压力），当  $B > 0.95$  时，说明饱和度已达 98% 以上，可终止饱和，否则需继续施加反压。一般只需施加二、三级反压即可满足要求，一般不超过四级。

在  $B$  值大于 0.95 时，饱和过程结束，制样完毕。

试验中，要求  $B$  值  $\geq 0.95$ 。此时饱和度  $S_r$  可达 98% 以上。实际上达到饱和所需施加的反压值可由下式估算：

$$u_0 = u_a \left[ \frac{100 - (1 - h)S_0}{100 - (1 - h)S_f} - 1 \right] \quad (1)$$

式中： $u_0$ ——所需施压的反压力 / kPa；

$u_a$ ——大气压力为  $1.013 \times 10^2$  kPa；

$h$ ——亨利系数（即空气溶解系数，20℃ 时为 0.02）；

$S_0$ ——加反压前起始饱和度 / %；

$S_f$ ——最后饱和度 / %。

从上式看出提高试样初始饱和度对于降低反压值的意义。一般经过二氧化碳与水头饱和后， $B$  值大于 0.8，此时  $S_r$  值已经大于 90% 后，代入 (1) 式，反压值在 200 kPa 以内，即能达到要求。在  $B$  值大到 0.95 后，保持反压值 1 h 以上，以利于空气的进一步溶解和调整。

### 4 颗粒破碎的评价

颗粒破碎是一个与粒径、级配、颗粒形状、有效应力状态、有效应力路径、孔隙比、颗粒硬度及含水量有关的复杂过程。颗粒破碎最明显的表现是试验前后级配曲线的变化，因此，许多研究者把试验前后级配曲线上某一几何点的变化，如  $D_{10}$ 、 $D_{15}$  等作为颗粒破碎的衡量指标。文 [1] 中全面考虑了级配曲线，以试验前后级配曲线与  $D = 0.074$  竖线三条线所包围的面积为总破碎  $B_t$ ，而将试验前级配曲线与  $D = 0.074$  竖线所围的面积为破碎势  $B_p$ ，从而定义相对破碎  $B_r$  (图 1)：

$$B_r = \frac{B_t}{B_p}$$

Hardin 的研究表明， $B_r$  在其他条件不变，只有颗粒级配为一变量时是与级配无关的量，为一常数。试验表明，对钙质砂而言， $B_r$  也是一个与级配无关

的量, 且与应力、应变、塑性功等标志剪切过程的物理量有相关关系。可以将  $B_r$  作为评价颗粒破碎的指标, 讨论颗粒破碎的一些问题。

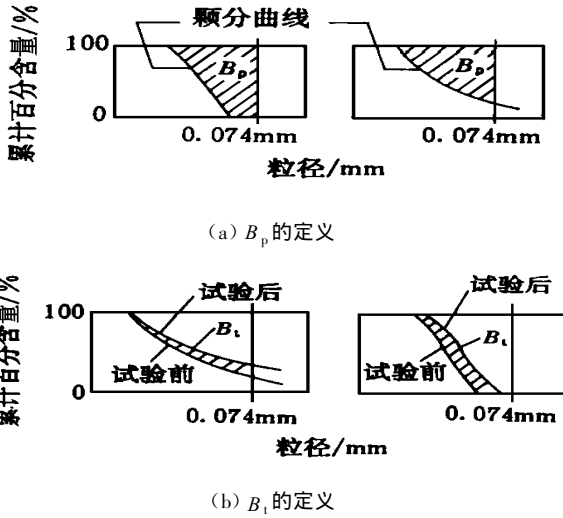


图 1  $B_r$  的定义

Fig. 1 Definition of  $B_r$

### 5 钙质砂的强度

由于钙质土地区既有建于岛礁之上的国防及工农业建筑, 也有水下几十米甚至上百米水深的海洋平台、海底管线等, 需要研究从低压到高压水平的强度特性。图 2 所示为典型钙质砂三轴固结排水剪应力-应变曲线, 可见在低围压下(如  $\sigma_1 = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 0.1 \text{ MPa}$ )应力-应变曲线有峰值, 剪切中体积增加。在高压下(如  $\sigma_1 = 1.0 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_3 = 2.5 \text{ MPa}$ ), 应力-应变曲线没有明显峰值出现, 而剪切过程中体积减小。图 3 是按《土工试验方法标准》(GBJ123-88)规

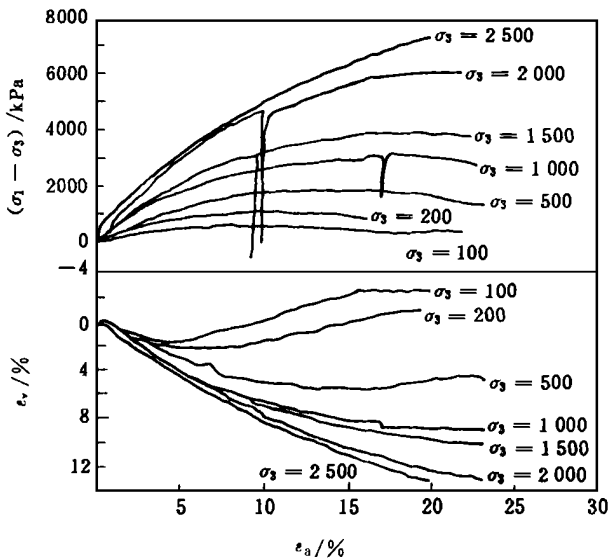


图 2 典型三轴固结排水剪  $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \epsilon_1 - \epsilon_v$  曲线

Fig. 2 The  $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \epsilon_1 - \epsilon_v$  curve of typical

定在三轴试验中对有峰值时取峰值点为破坏点, 对峰值不明显时取  $\epsilon_1 = 15\%$  时作为破坏点得到的强度包线, 可见其呈明显的非线性特征, 随围压增高, 曲线斜率减小。

从  $\sigma_3 = 1.0, 1.5, 2.0 \text{ MPa}$  的卸载再加载曲线可看出, 剪应变以塑性应变为主。试样在加载后会产生连续的塑性变形, 在变形足够大时, 即使尚未达到应力强度破坏值, 变形已使结构物不能正常工作了。因此, 强度取值时不仅要考虑应力, 还要考虑变形是否满足要求, 即将根据结构物的工作状态来确定砂土的强度取值范围。对于钙质砂的强度取值, 应实行应力和变形双项控制取值, 且应采用变形条件优先。也就是说, 根据结构物的允许变形条件, 如它大于应力强度峰值对应的应变, 则取应力峰值作为强度, 反之取该应变所对应的应力值作为强度。

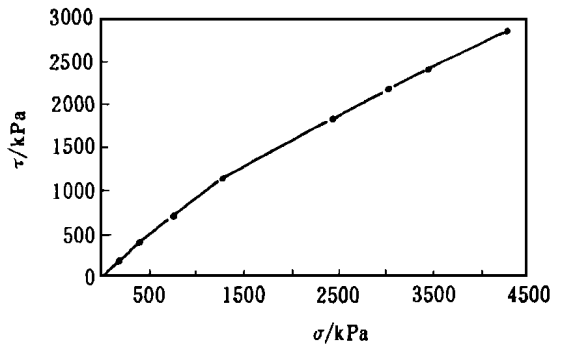


图 3 摩尔-库仑强度包线

Fig. 3 Mohr-Coulomb strength envelope

### 6 结 论

- (1) 钙质砂土粒比重宜用以煤油作液体的比重瓶法测定, 其一般值为 2.73 左右。
- (2) 钙质砂在三轴剪切试验中采用干砂制样, 二氧化碳冲洗, 水头饱和、反压饱和联合饱和方法, 可使备样和饱和过程很快完成。
- (3) 钙质砂颗粒破碎的评价可用  $B_r$  作为指标。
- (4) 钙质砂强度取值中应综合考虑应力与变形, 且变形条件优先的取值方法。
- (5) 钙质砂的三轴排水剪破坏包线为非线性曲线,  $\phi$  值随围压增高而降低。

### 参 考 文 献

- 1 Hardin B.O. Crushing of soil particles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 111(10): 1177-1192
- 2 刘崇权, 汪 稔. 钙质砂物理力学性质初探. 岩土力学, 1998, 9(1): 32-37

## SOME PROBLEMS FOR THE TESTS OF PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CALCAREOUS SAND

Liu Chongquan<sup>1</sup> Wang Ren<sup>1</sup> Wu Xinsheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071*)

(<sup>2</sup> *Longgang Real Estate Company, Shenzhen 518000*)

**Abstract** The micro-structure and mechanism of deformation of calcareous sand are different from that of terrigenous sand. It is necessary to use new experiment technique to fit its characters. The methods are discussed for measuring grain specific gravity and void ratio, preparing sample for triaxial test, evaluating particle crushing and estimating soil strength.

**Key words** calcareous sand, tests of physico-mechanical properties

## 数值流形方法及裂纹扩展的模拟

王水林

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

**博士学位论文摘要** 基于石根华博士提出的数值流形方法理论, 将其应用于模拟裂纹的扩展过程, 为用数值方法研究脆性介质中裂隙的演化行为提供了一条简单而有效地新途径, 而且对该方法进行了一点拓广, 并对该方法的进一步应用进行了讨论。

首先介绍了数值流形方法中的数学覆盖、物理覆盖与流形单元等基本概念, 研究了模拟裂纹扩展过程中物理覆盖与流形单元的变化规律。由于在该过程中, 数学覆盖(通常用有限元网格形成)可以保持不变, 使得该方法易于实现。然后利用线弹性断裂力学中环向拉应力准则, 通过数值流形方法实现了平面 I - II 混合型张裂纹扩展的数值模拟。算例表明了算法的有效性。

为了研究闭合裂纹面的力学行为, 引入了改进的拉格朗日乘子法(Augmented Lagrangian Method)模拟界面的接触摩擦问题。该方法使用材料界面的接触判断条件控制界面的粘结、滑动与张开, 以界面上节理单元的刚度系数作为罚参数, 迭代求解代表界面接触应力的拉氏乘子。在验证了方法的正确性之后, 将数值流形方法与改进的拉氏乘子法结合, 进一步模拟了闭合裂纹面的相对滑动引起裂纹尖端产生张应力的裂纹扩展过程。数值结果与实验结果比较证明了上述模拟过程的正确性。

随后将由 3 个物理覆盖构成一个流形单元的流形方法拓广至 4 个物理覆盖构成一个流形单元的情形, 并将其应用于裂纹扩展的模拟, 结果令人满意。由此分析有限元法与数值流形思想的关系, 提出了有限元方法中的流形单元的看法。最后, 对提高数值流形方法的计算精度进行了探讨, 指出了物理覆盖上使用完备的一阶近似函数时数值结果精度更高。与此同时, 将其思想延拓至有限元方法之中, 提出了三节点二次协调元的构想。

另外文中还做了一些裂纹体试件的数值试验, 得到了一些合理的结果。

**关键词** 数值流形方法, 裂纹扩展, 接触摩擦, 改进的拉格朗日乘子法, 完备的一阶近似函数

## NUMERICAL MANIFOLD METHOD AND SIMULATION OF CRACK PROPAGATION

Wang Shuilin

(*Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071*)

1998 年 9 月 30 日收到来稿。

**作者** 王水林 简介: 男, 1965 年生, 1998 年 7 月在中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 导师是葛修润院士; 现主要从事岩土力学的数值方法研究。