

文章编号: 1001-4888(2009)02-0133-11

钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究^{*}

王丽, 鲁晓兵, 王淑云, 赵京, 王爱兰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 对南海钙质砂进行了三轴实验研究, 重点针对不同胶结情况下的力学性质, 如不同胶结材料和含量的变化对强度和应力应变特性的影响等。研究表明, 钙质砂具有与陆源砂不同的性质, 它的内摩擦角高达 48° , 远大于一般陆源砂的 35° 左右; 在低围压下钙质砂表现出剪胀性, 但随围压增加剪胀性降低; 利用硅酸盐水泥作为胶结材料效果较好; 随着水泥含量的增加, 钙质砂试样的强度增加。

关键词: 钙质砂; 力学性质; 胶结; 强度; 应力应变

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A

0 引言

钙质砂是一种海洋生物成因的含 CaCO_3 超过 50% 以上的粒状材料。它通常是指由海洋生物(珊瑚、海藻、贝壳等)成因的、富含碳酸钙或碳酸镁等物质的特殊岩土介质, 主要分布于热带海洋中。钙质砂的主要化学成分为 CaCO_3 。钙质砂有骨骸、球粒、包粒和团粒 4 种颗粒类型^[1,2]。棱角大, 有内孔隙, 孔隙比高, 易破碎, 是钙质砂的主要特征^[1,2]。

从 20 世纪 60 年代开始, 由于海洋石油工程的发展, 在世界许多地区都遇到钙质砂, 由于当时对其特殊的物理、力学性质缺乏了解, 使工程在建设和运行过程中出现了一系列的问题, 引起了岩土界广泛的注意^[3-5]。在我国南海海域广泛分布着钙质砂, 大多为粒状或碎屑状, 且 CaCO_3 含量大多在 90% 以上, 主要为珊瑚碎屑。我国直到 20 世纪 80 年代, 中国科学院力学研究所、武汉岩土力学研究所和南海海洋研究所在南沙联合科学考察中, 才开始将钙质砂作为具有特殊工程力学性质的研究对象。

由于海底天然钙质砂胶结程度和密度空间分布的不均匀性, 获得高质量的样品就较难, 因而研究其响应就困难。为此, 人们开始用人工胶结的砂土进行研究, 这样可以制成胶结均匀的样品, 通过试验获得主要的特征。

最早寻找人工胶结制样方法的是 Akili 和 Torrance^[6]。他们首先尝试了用富含方解石的水进行胶结, 结果 3 个月后沉淀的方解石仍非常少, 于是这种方法被放弃; 后来采用化学方法形成方解石的方法进行胶结, 发现有一定的效果。后来又有人采用过饱和 CaCO_3 溶液等方法进行胶结^[7,8]。这些早期的制样方法在胶结过程还常常导致砂土中细颗粒的分离, 后来出现了所谓的 CIPS (Calcite In situ Precipitation System), 认为可以较好地模拟天然钙质砂的胶结状态, 但是目前应用该方法的实验室也不多, 因为这种方法需要一套较复杂的制样系统^[9,10]。

目前人们针对钙质砂的胶结方法和胶结后的成分、结构等进行了部分研究, 对胶结后材料的力学性质研究很少。鉴于此, 本文用取自南沙永暑礁松散钙质砂采用水泥等材料胶结后进行三轴试验, 对胶结

* 收稿日期: 2009-01-26; 修订日期: 2009-03-13

基金项目: 本文获得国家高技术研究发展专项(863)经费和中科院三期创新方向性项目“KJ CX2- YW-L02”资助

通讯作者: 鲁晓兵(1968 -), 男, 副研究员, 从事岩土力学与海洋工程研究。E-mail: xbinlu @sohu.com

后的应力应变特性和强度进行研究,考察不同胶结方法对钙质砂强度指标的影响,为实际工程设计提供一些参考。

1 试验用钙质砂物性参数

钙质砂由于是海洋生物成因,颗粒粒径一般大于 0.1 mm,采用筛分法进行颗粒级配分析。南沙永暑礁松散钙质砂颗粒级配曲线见图 1。占试样总质量百分数分别为 60%、50%、30%、10% 的砂土对应的最大粒径 d_{60} , d_{50} , d_{30} , d_{10} , 以及不均匀系数 C_u , 曲率系数 C_c 等参数见表 1。从不均匀系数和曲率系数可知,该钙质砂样为粗粒土(钙质砂目前没有专门的分类标准,本文是参照一般土的分类进行的)。

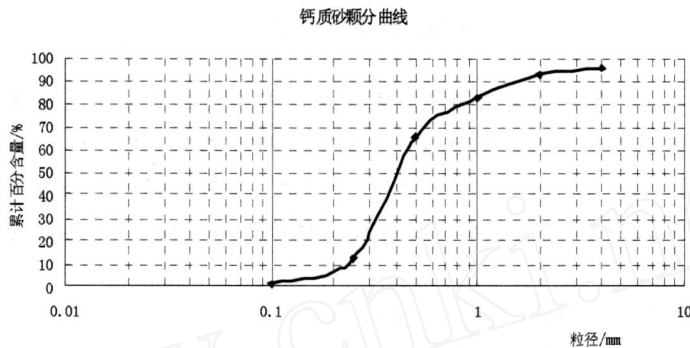


图 1 试验用钙质砂颗粒级配曲线

Fig. 1 The grain size distribution

表 1 试验用钙质砂粒径参数

Tab. 1 The diameter parameters of the calcareous sand ($C_u = d_{60}/d_{10}$, $C_c = d_{30}^2/d_{10}/d_{60}$)

d_{60}/mm	d_{50}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	C_u	C_c
0.46	0.41	0.33	0.24	1.92	0.99

南海钙质砂基本上是生物成因的,这种土颗粒往往存在着许多内孔隙,且后面的钙质砂基本力学性质试验所用的试样颗粒最大粒径不超过 5.0 mm,因此,本次试验中采用比重瓶法。由于钙质砂颗粒表面含有易溶盐,用纯水作为液体进行时,测得的比重偏低,因此试验中以煤油液体进行,测得的比重 $G_s = 2.73$ 。试验用钙质砂的密度和孔隙比见表 2。

2 无胶结情况下的应力应变和强度试验

本文试验中分别对三个砂样(A, B, C)进行了固结排水剪切试验(称为 CD 试验),三个试样的参数见表 2,其中相对密度计算采用公式 $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$, e 为试验样品的孔隙比。

表 2 基本物理性质指标

Tab. 2 Basic physical index

	min (g/cm^3)	max (g/cm^3)	d (g/cm^3)	e_{\max}	e_{\min}	e	D_r
A	1.131	1.421	1.34	1.4138	0.9204	1.03	0.77
B			1.26			1.16	0.51
C			1.18			1.31	0.20

砂样 B 在不同围压下的固结排水剪应力应变曲线如下图 2。从曲线中可以看出,在低围压 σ_3 为 50 kPa 时,具有较明显的剪胀性;随着围压增高,应变软化的趋势变缓,破坏应变增高,体变由膨胀向缩小方向转化。图 2(b) 给出了最高围压为 200 kPa 时的体变 - 轴向应变曲线。可以看出,200 kPa 时体变基本没有增加。对于相对密度大于 50% 的普通陆源石英砂,在 1 MPa 下不会发生颗粒破碎,随着围压

的增加,剪胀性也越明显。而钙质砂在 200kPa 即出现了剪缩。这可能是由于高围压下钙质砂的颗粒易破碎,颗粒重组,体积减小,发生剪缩。

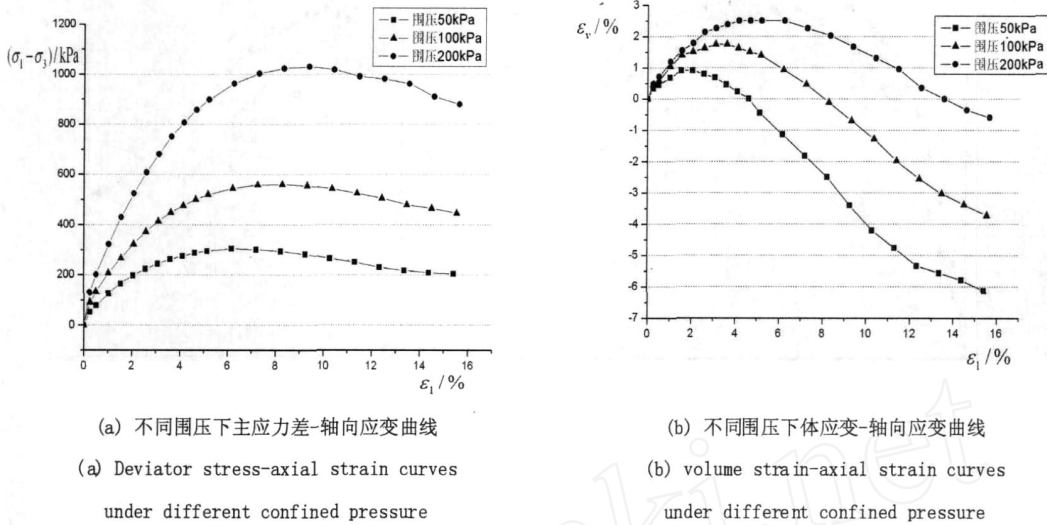


图 2 砂样 B 固结排水剪切 (CD) 试验曲线

Fig. 2 The CD experimental curves of sample B

从图 3 中可以看出,随着相对密度的增加,钙质砂应力应变曲线峰值增大;从体变-轴向应变曲线来看,相对密度较大的砂样剪胀性更明显;钙质砂在低围压下可能剪缩,也可能剪胀,这取决于它的初始孔隙比。从固结排水有效应力路径来看,破坏点基本位于一条直线之上(图 4)。因此,在应变足够高的情况下,试样可以达到峰值,只是这时的应变软化不是由剪胀引起,而是由于颗粒破碎引起的粒间结构的破坏所致。

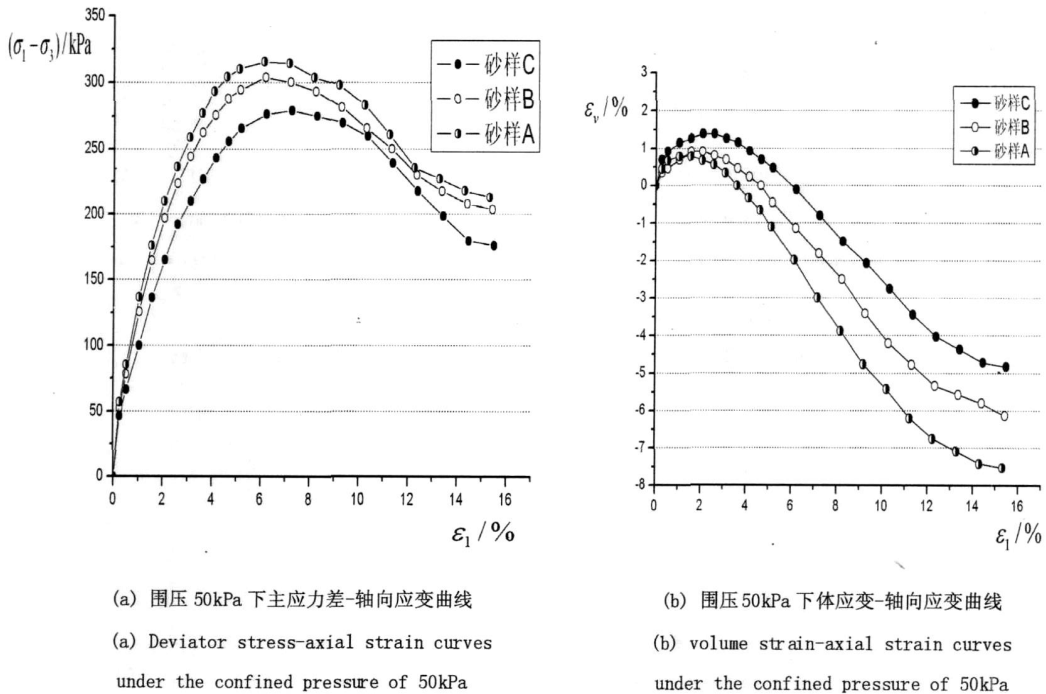
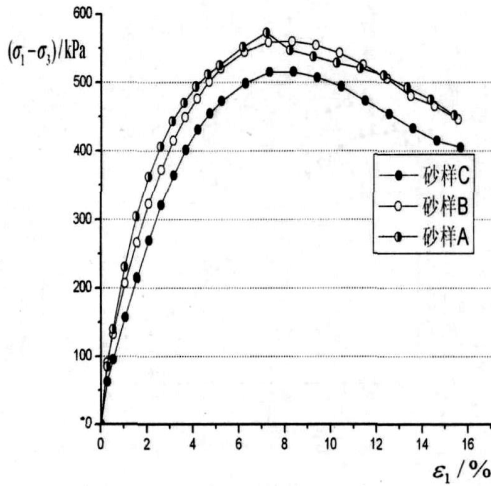
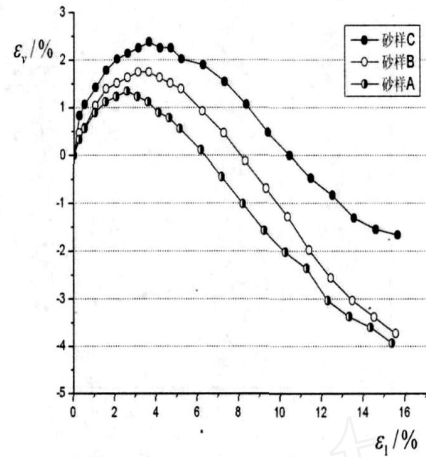


图 3 不同密度下固结排水剪应力应变曲线

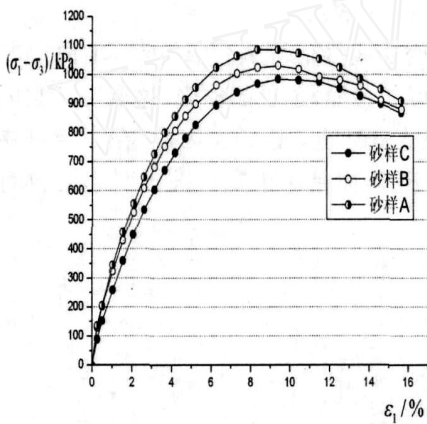
Fig. 3 CD experimental curves under different densities



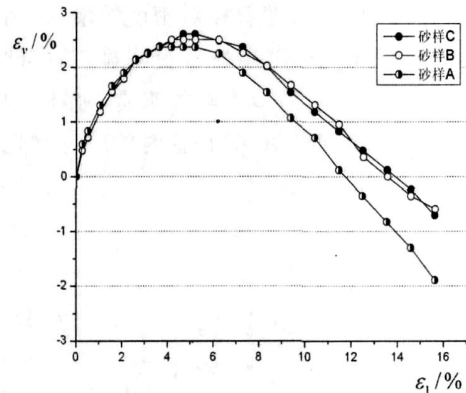
(c) 围压 100kPa 下主应力差-轴向应变曲线
(c) Deviator stress-axial strain curves under the confined pressure of 100kPa



(d) 围压 100kPa 下体应变-轴向应变曲线
(d) volume strain-axial strain curves under the confined pressure of 100kPa



(e) 围压 200kPa 下主应力差-轴向应变曲线
(e) Deviator stress-axial strain curves under the confined pressure of 200kPa



(f) 围压 200kPa 下体应变-轴向应变曲线
(f) volume strain-axial strain curves under the confined pressure of 200kPa

图 3(续) 不同密度下固结排水剪应力应变曲线

Fig. 3 CD experimental curves under different densities

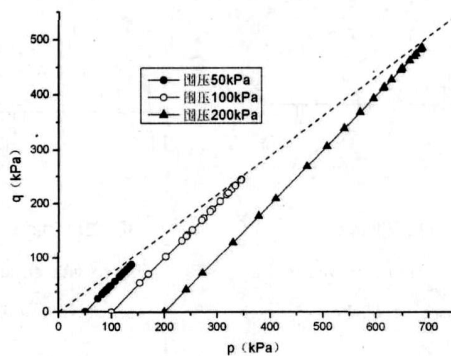


图 4 砂样 B 固结排水有效应力路径

Fig. 4 The effective stress paths of sample B under CD conditions

从图 5 中可以看出,钙质砂的排水剪切强度包线随着围压的增高而略有变缓,这可能是由于钙质砂在低围压下就有颗粒破碎,使级配随剪切过程而改变,从而使强度指标随围压而改变。表 3 给出了不同相对密度下钙质砂样的摩尔库仑强度指标。

表 3 不同相对密度下砂样强度指标

Tab.3 The strength indexes of samples under different densities

d (g/cm ³)	1.34	1.26	1.18
C (kPa)	0	0	0
(度)	48.2	47.7	46.4

注:其中 d 为砂样密度, C 为凝聚力, φ' 为内摩擦角。

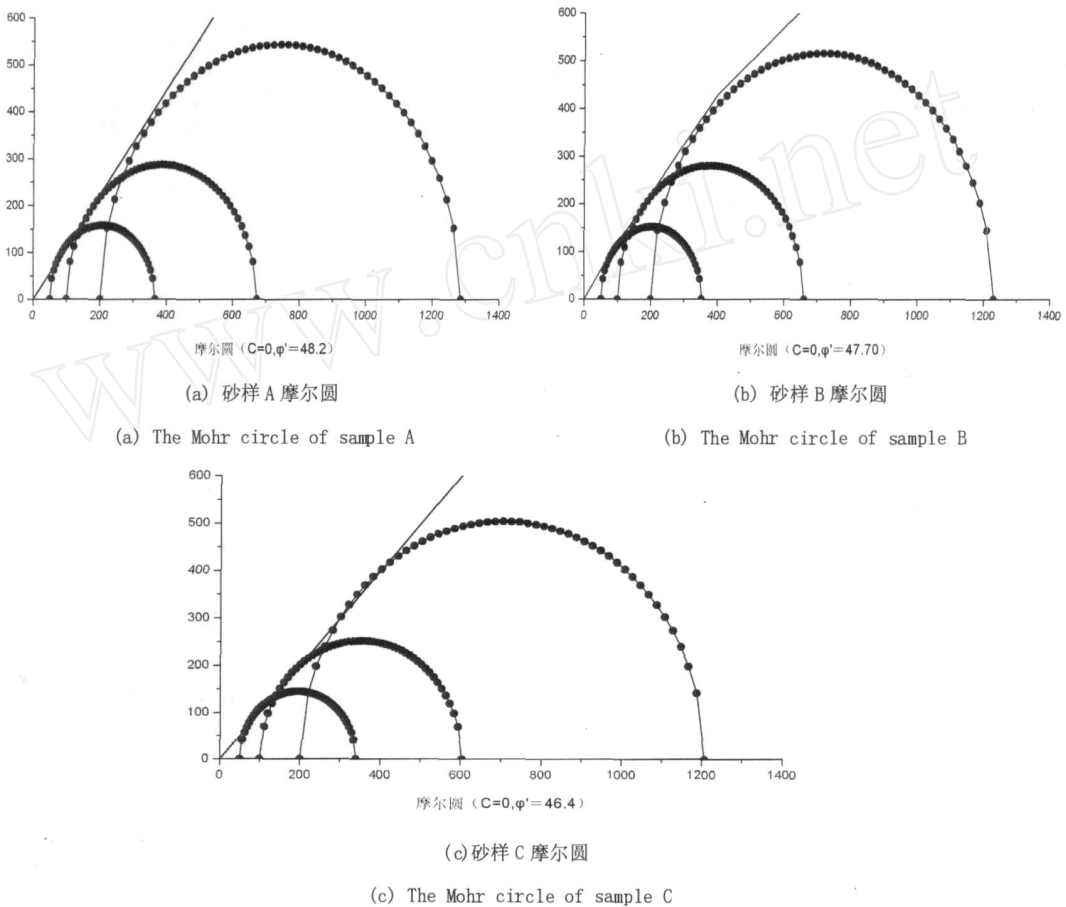


图 5 不同相对密度下的摩尔圆

Fig.5 The Mohr circles under different densities

3 胶结作用对钙质砂强度的影响

钙质砂的胶结性使得它不同于普通砂土,也导致在工程中出现了很多问题。近几十年来,钙质砂地基中深基础往往采用钻孔灌注或沉管灌注的形式,在基础周围的钙质砂土体中注入混凝土或其他胶结材料,主要目的就是为了提高基础周围钙质砂土体的抗压缩性以及基础与土体接触面的粘性和摩擦力。本文中选用建筑石膏粉、方解石粉(重质碳酸钙粉)、硅酸盐水泥(Portland cement)对钙质砂胶结性进行尝试,然后在此基础上进行胶结性对钙质砂力学性质影响的试验研究。文中采用的石膏粉为 400 目,方解石粉为 400 目,硅酸盐水泥标号为 P32.5。

3.1 试样制备

一般来说,对砂土进行胶结有注射、混合以及加电极等方法。在本文的胶结试验过程中,曾经尝试

过烧结的办法,由于钙质砂颗粒较粗,孔隙比较大,烧结形成的粘聚强度很小,非常容易受扰动而失去胶结。故最终采用混合法:即事先按照一定的比例(重量)将胶结材料与钙质砂均匀混合,加入一定量的水将混合物均匀拌和,倒入三轴仪制样用的三瓣模中,均匀捣实。静置3天,待试样胶结。试验前,将样品脱模放入三轴试验机中开始试验。静置时间不同,胶结程度不一样,这方面的工作将在随后进行。图6为实验室采用石膏粉、方解石粉及硅酸盐水泥胶结后形成的试样。图7为试验后的试样。

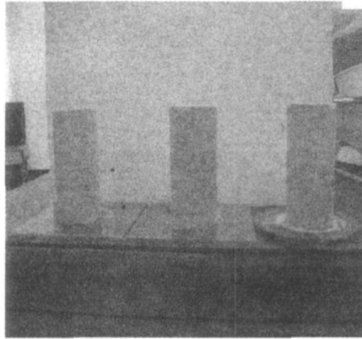


图6 胶结后试样

Fig. 6 The cemented samples



图7 CD试验后试样

Fig. 7 A sample after experiment

3.2 胶结后无侧限时的应力应变和强度特性

用三种胶结材料都可将钙质砂制成如图6所示的试样,对这几个胶结试样进行无侧限压缩试验,得到图8所示的无侧限应力应变曲线。可以看出,水泥含量为15%的试样的无侧限压缩强度得到了很大的提高,约为800kPa;10%水泥含量的试样次之,约为260kPa;而5%水泥含量、10%石膏含量、10%方解石含量的试样仅为100kPa。出现这种情况的原因可能是石膏形成胶结时是单方晶体,具有各向异性,在某一个方向上强度非常低,很容易破坏,因而表现出低强度的特征;而水泥本身形成团状颗粒,强度也较高,这些颗粒具有粘性,填充在钙质砂孔隙之中,将钙质砂颗粒间连接起来。在轴向压缩下,由于水泥颗粒本身强度较高,首先破坏的是水泥颗粒与钙质砂颗粒的胶结面,水泥含量较低时,这个面上还是点点接触,强度不够高,较易破坏,因而强度增加幅度不大;当水泥含量较高时,两种颗粒之间由点点接触变成面面接触,胶结面的粘聚力增大很多,因而在水泥高含量下,无侧限压缩强度得到了大幅提高。可见,胶结的作用强弱不仅与钙质砂本身的性质有关,与采用的胶结物质的性质和含量也有关;胶结物质本身的强度也起着重要的作用。值得注意的是,对于不同地区、不同组成、不同孔隙比的砂,达到一定强度所需的胶结物质含量是不同的,它主要取决于砂的孔隙比、颗粒级配以及棱角等。

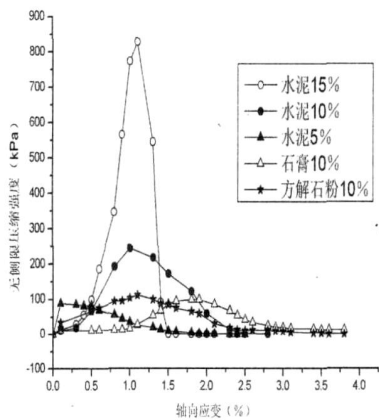


图8 胶结试样无侧限压缩试验曲线

Fig. 8 Curves under non-confined pressure of cemented samples

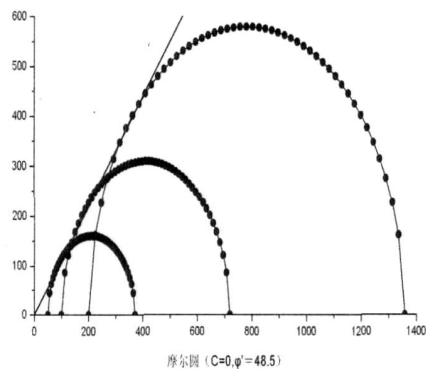


图9 方解石粉作为胶结材料 CD 试验摩尔圆

Fig. 9 Mohr circle under CD conditions for the samples cemented by calcite

3.3 方解石粉为胶结材料时的应力应变和强度特性

图9给出了含5%方解石粉为胶结材料的试样在围压50kPa、100kPa、200kPa下的固结排水剪切试

验结果。可以看出,试样的内聚力为零,内摩擦角为 48.5°,较无胶结时的大。

图 10 是利用 5%方解石粉对钙质砂进行胶结之后与未胶结情况的对比。可以看出,使用方解石粉进行胶结之后的试样,峰值强度提高约为 15%,且峰值出现稍有提前,残余强度变化不大。

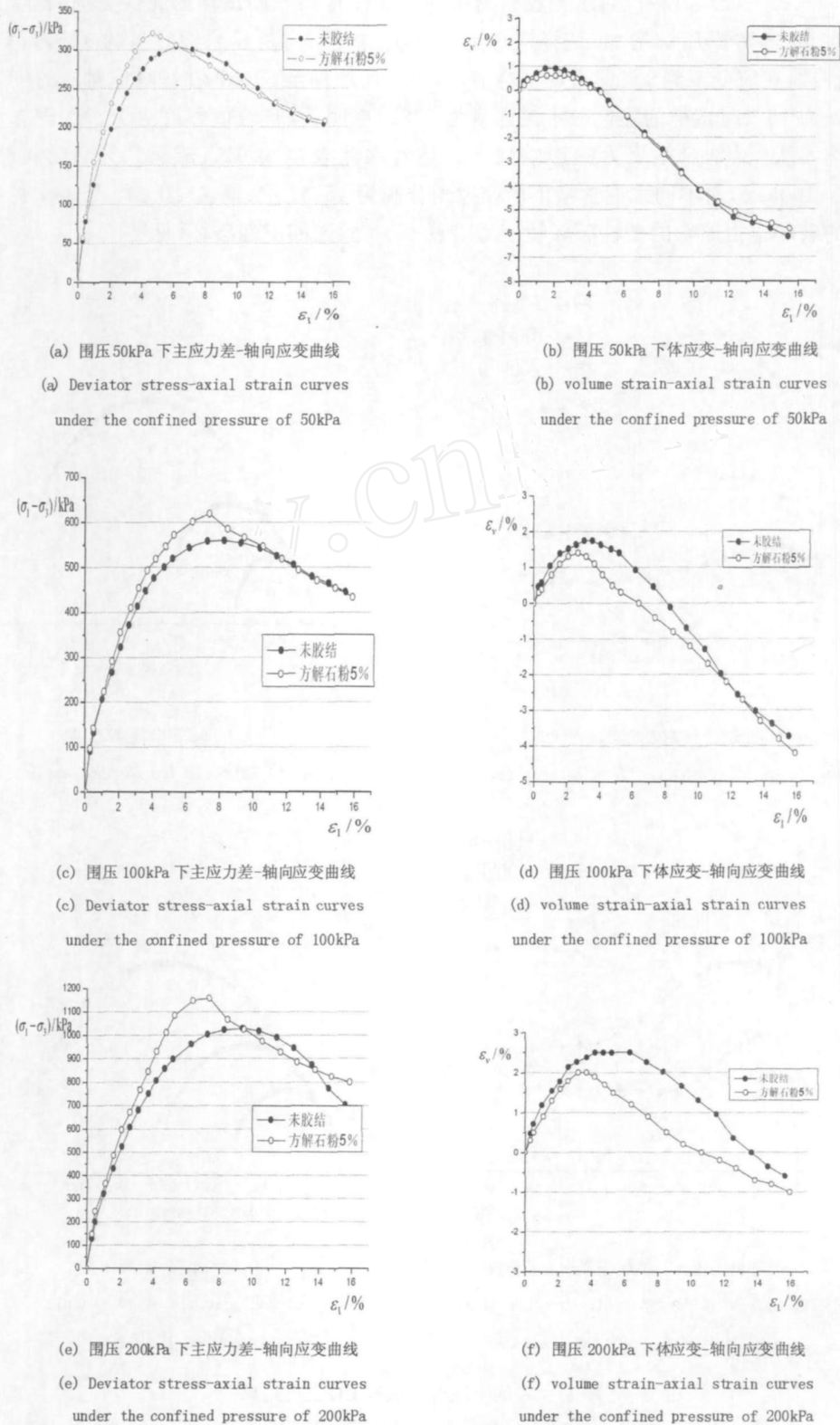


图 10 方解石粉作为胶结材料 CD 试验曲线

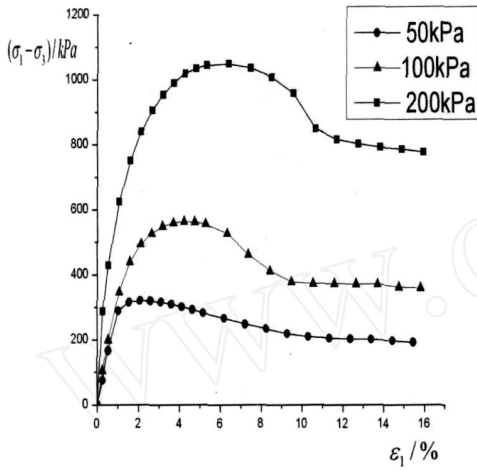
Fig. 10 Experimental curves under CD conditions for the samples cemented by calcite

3.4 以水泥为胶结材料时的应力应变和强度特性

以硅酸盐水泥为胶结材料的试样在不同围压下 50kPa、100kPa、200kPa 下的固结排水剪切试验结果,以及与未胶结的重塑土样的结果比较见图 11。

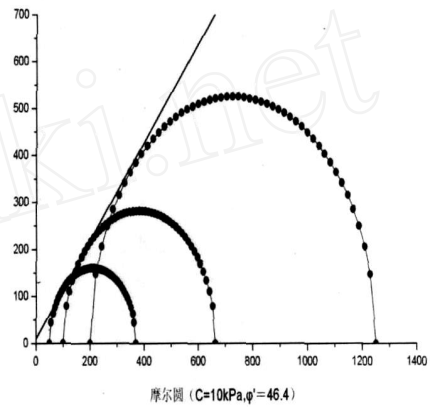
从图 11(a)、(c)、(e)可以看出,水泥胶结物质的添加使得钙质砂试样的脆性更加明显,这种趋势在低围压下更突出;随着围压的增加,试样破坏应变增大;如图(e)所示水泥含量为 15%,围压为 50kPa 时,应力应变曲线在应变不到 1%即出现了峰值,而当围压增加至 200kPa 时,峰值对应的应变约为 5%。

水泥含量为 15%时试样的脆性较水泥含量为 5%时更明显,且峰值强度更大。水泥含量的增加对摩擦角的影响不大,但是对粘聚力的影响较大。随着水泥含量为 0%、5%、10%、15%,粘聚力为 0、10kPa、50kPa、100kPa,而不同水泥含量下内摩擦角分别为 46.4°、46.4°、45.0°、45.0°。水泥的添加使得钙质砂试样的破坏也由原来的塑性破坏转变为沿着 45.0°斜面的脆性破坏(见图 7)。



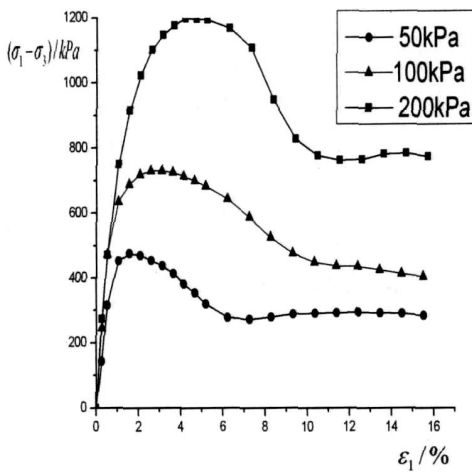
(a) 不同围压下主应力差-轴向应变曲线

(a) Curves of deviator stress-axial strain



(b) 5%水泥含量 摩尔圆

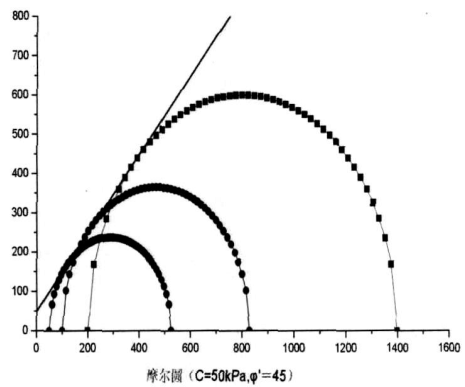
(b) Mohr circles of the sample



(c) 不同围压下主应力差-轴向应变曲线

(c) Curves of deviator stress-axial strain

under different confined pressure



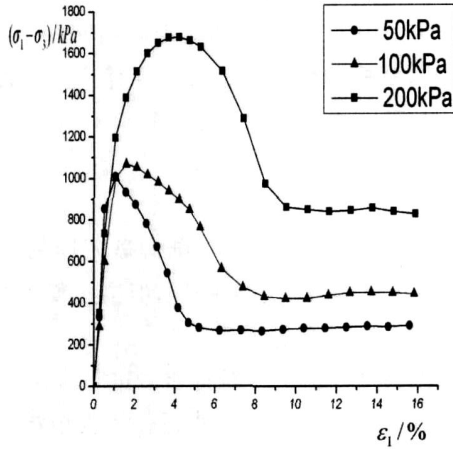
(d) 10%水泥含量 摩尔圆

(d) Mohr circles of the sample

contained 10% cement

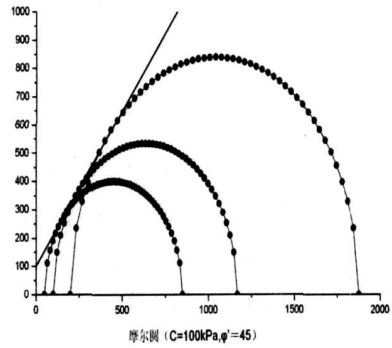
图 11 不同水泥含量试样 CD 试验结果

Fig. 11 Experimental results under CD conditions for the samples contained cement



(e) 不同围压下主应力差-轴向应变曲线

(e) Curves of Deviator stress-axial strain under different confined pressure

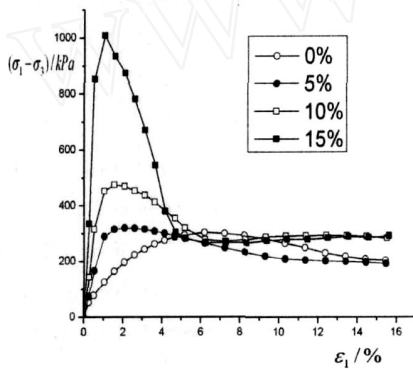


(f) 15%水泥含量 摩尔圆

(f) Mohr circles of the sample contained 15% cement

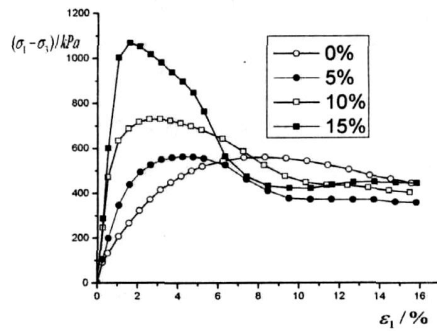
图 11(续) 不同水泥含量试样 CD 试验结果

Fig. 11 Experimental results under CD conditions for the samples contained cement



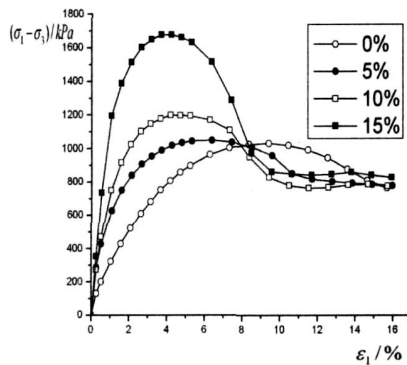
(a) 50kPa 下应力-应变曲线

(a) Stress-strain curves under 50kPa



(b) 100kPa 下应力-应变曲线

(b) Stress-strain curves under 100kPa



(c) 200kPa 下应力-应变曲线

(c) Stress-strain curves under 200kPa

图 12 不同围压下水泥含量试样的应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves under different confined pressure and with different cement contents

图 12 是围压分别为 50kPa、100kPa、200kPa 时,不同水泥含量的试样应力应变曲线比较。以图 12

(a) 为例,应力应变曲线的峰值强度随着水泥含量的增加而增加,而残余强度基本保持一致。随水泥含量增加,应力峰值对应的应变减小。峰值强度在 5%、10%、15% 含量下分别较未胶结时峰值强度增加了 5%、50%、230%。可以看出,当水泥含量增加至 15% 时,试样的变形模量及强度有了很大的提高;水泥含量 5% 对钙质砂的强度影响不大,也就是说胶结效果不明显。

4 结 论

1) 对无胶结钙质砂进行了固结排水剪切试验。结果表明,钙质砂具有与陆源砂不同的性质,它的摩擦角高达 48° ,远大于一般陆源砂的 35° 左右;在低围压下钙质砂表现出剪胀性,但围压仅增至 200kPa 时,剪胀的趋势已经不明显;围压越高,应力应变曲线应变软化的趋势越缓。

2) 在实验室利用不同胶结材料(方解石粉、硅酸盐水泥、建筑石膏粉)对钙质砂进行人工胶结,研究胶结材料以及对比对胶结后钙质砂强度的影响。试验结果表明,利用硅酸盐水泥作为胶结材料,可取得较好的效果。随着水泥含量的增加,钙质砂试样的强度迅速提高;在硅酸盐水泥含量为 15% 时,峰值强度约为未胶结重塑土样的 170%,而残余强度基本不变;利用方解石粉以及水泥进行胶结,钙质砂的内摩擦角变化都不大;水泥作为胶结材料时,粘聚强度有较大提高,水泥含量为 5% 时为 10kPa,而含量增至 10% 和 15% 时分别为 50kPa 和 100kPa。石膏粉和方解石粉作为胶结材料时,在非饱和的情况下可以形成直立的试样,而这两种胶结材料遇水饱和和易软化,丧失胶结性,故固结排水剪切试验得到的强度与未胶结的情况相比变化不大。

3) 由于钙质砂的胶结方法还不成熟,本文工作只是探索性的研究,对于如何制备出与实际场地符合的胶结钙质砂,还需要开展相当多的工作。

参考文献:

- [1] 刘崇权,单华刚,汪稔. 钙质土工程特性及桩基工程[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(3):331 - 335 (Liu Chongquan, Shan Huagang, Wang Ren. The Geotechnical Characters of Calcareous Soils and the Pile Foundation Engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,18(3):331 - 335(in Chinese))
- [2] 刘崇权,汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学,1998,19(1):33 - 37 (Liu Congquan, Wang Ren. Preliminary Research on Physical and Mechanical Properties of Calcareous Sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998,19(1):33 - 37 (in Chinese))
- [3] Wiltse E A, Hulelt J M, Murff J D, et al. Foundation design for external struff strengthening system for bass strait first generation platforms[C]. Proc. Int. Conf. on Calcareous sediments. Australia:Perth,1988,(1):321 - 330.
- [4] De Mello J R C, Amaral C D S, et al. Closed-Ended pile piles: Testing and piling in calcareous sand[C]. Proc. 21th Annual offshore Technology Conf., Australia: Houston,1989:341 - 352.
- [5] Nauroy J F, Le Tirant P. Model tests of piles in calcareous sands[C]. Proc. Conf. on Geotechnical Practice in Offshore Engineering. Australia: Texas,1983:356 - 369.
- [6] Akili W, Torrance J K. The development and geotechnical problems of Sabkha, with preliminary experiments on static penetration resistance of cemented sands[J]. Q. J. Engrg. Geol., 1981, 14: 59 - 73.
- [7] Huang J T, Airey D W. Properties artificially cemented carbonate sand[J]. J. Geotech. Geoenvironment, 1998, 124(6): 492 - 499.
- [8] Cailleau P. Etude petrologique experimentale de la cementation calcitique et aragonitique[D]. Thesis Universite de Bordeaux 3, 1982.
- [9] Ismail M A, Joer H A, Randolph M F. Sample preparation technique for Artificially cemented soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(2): 171 - 177.
- [10] Kucharski E, Price G, Li H et al. Engineering properties of CIPS-cemented calcareous sand[C]. Proc. 30th Int. Geol. Cong., Beijing, Brill Academic, 92 - 97.

Experimental Investigation on Cementation of Calcareous Sand and Its Basic Mechanical Characteristics

WANG Li , LU Xiao-bing , WANG Shu-yun , ZHAO Jing , WANG Ai-lan

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

Abstract : Tri-axial experiment was carried out to study the basic mechanical properties of calcareous sand exploited from South China Sea. The attention was focused on the cementation effect of different materials on the mechanical properties , e. g. , the effect of cementation materials content and type on the strength and stress-strain characteristics. Results show that the calcareous sand has many different properties from the terrigenous sand , such as its internal friction angle (48°) is much larger than that of terrigenous sand (35° approximately) , and the dilatancy is obvious under low confined pressure but disappears gradually with the increase of confined pressure. Portland cement is a good cementation agent. The strength of calcareous sand increases with the increase of Portland cement content.

Key words : calcareous sand ; mechanical properties ; cementation ; strength ; stress-strain