

钙质土的基本特性

吴京平 楼志刚 (中国科学院力学研究所)

提要 本文在简述钙质土的成因和组成的基础上,介绍分析了该种土的基本物理力学性质,尤其是其受力后颗粒的破碎、强度、压缩及循环荷载下强度衰减的特性。

一、前言

钙质土通常是指富含碳酸钙颗粒或天然胶结物的碳酸盐沉积,它是海洋沉积物中的一种。1968年在伊朗海域安装一导管架平台,当一直径为762 mm的钢管桩被沉入7.5m深度进入钙质土层时,仅在其自重作用下突然下沉近16m。此后,钙质土相继在澳大利亚、菲律宾、印度和巴西等国海域内导管架平台场址的土工调查中被发现。1988年,在我国南海某平台场址的土工勘探调查中,也遇到了钙质土。由于钙质土特殊的成因和组成,其物理力学性质与其它类型的沉积物相比有较大的差异。

二、钙质土的成因和组成

已有的资料表明,钙质土多发现于北纬30度和南纬30度之间的、属热带或亚热带气候的大陆架和海岸线一带,其主要矿物成份为碳酸钙。它是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物。其形成时的沉积环境条件,如水深、温度、海进海退以及波浪和海流能量的高低,直接影响着土颗粒类型的选择和胶结的程度。

钙质土的颗粒有四种:*a.* 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;*b.* 球形颗粒,是一些实心的卵状或球状细粒,本身结构性很弱,甚至为海中生物的粪便;*c.* 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;*d.* 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土的结构骨架,在光学岩相显微镜下可观察到生物碎屑岩和碎屑岩之间的明显区别,即骨架式颗粒和粒间孔隙的大量存在。从矿物成分上看,碳酸钙是以方解石和文石的形式存在,它们的比重分别为2.70和2.93,其表面硬度分别为3.0和3.5。

胶结是钙质土的特征之一,它是在上述特殊的沉积环境里,于颗粒周围或颗粒之间形成晶体沉淀。胶结的程度有强有弱,可从颗粒表面的弱胶结到粒间孔隙被晶体充填的强胶结。

三、钙质土的基本物理力学性质

(一) 角状颗粒

钙质土的角状颗粒含量高。大量的研究表明：具有较高棱角度的钙质土往往具有较高的初始孔隙比，并且其颗粒易破碎。因此，曾有人建议将土的最大和最小孔隙比作为钙质土的分类系统中的一个指标。

(二) 颗粒的易破碎性

因钙质土颗粒本身强度较低，在很低的应力条件下颗粒就可能产生破碎，而当剪应力加大后，使颗粒与颗粒直接接触挤压时，颗粒的破碎程度将更大。Datta^[1]利用土样固结或受剪前后颗粒分布的变化，引入破碎系数 C_c 来描述土颗粒的易破碎性：

$$C_c = \frac{\text{受力后小于原 } D_{10} \text{ 颗粒的百分比}}{\text{原土中小于 } D_{10} \text{ 颗粒的百分比}}$$

Datta 对四种 CaCO_3 含量均大于 85% 的钙质砂 (A、B、C 和 D) 进行了对比试验研究，试验分两种类型，一种是在三轴压力室内仅作等向固结试验，另一种是三轴固结排水剪切试验。结果表明：钙质砂的破碎性明显大于非钙质砂的渥太华砂 (E)，如图 1 所示，而且在剪应力作用下的破碎性要比在等向固结条件下更大；其破碎性随着 (1) 围压的增加，(2) 剪应力的增大，(3) 粒间孔隙和片状贝壳碎片的增多，(4) 颗粒本身棱角度的增大，(5) 颗粒尺寸的增大而增加。土颗粒破碎的发生和发展将引起下述变化：(1) 应力-应变关系由脆性向塑性发展，(2) 由剪胀到剪缩体变特性的变化，(3) 最大有效主应力比降低。Datta 还将颗粒的破碎系数与土的强度特性相联系，引入规一化的最大有效主应力比 K/K_1 ，试验结果表明四种钙质砂均有良好的 C_c-K/K_1 关系，其数学表达式为：

$$K/K_1 = C_c^{-0.6}$$

式中 K 为在任一围压下颗粒破碎发生后最大有效主应力比， K_1 为颗粒尚未破碎前最大有效主应力比。

(三) 强度特性

三轴剪切试验结果显示：在相同的孔隙比和相近的颗粒分布条件下，钙质砂的摩擦角明显大于普通石英砂的摩擦角，即使是很松的、处于剪缩状态的钙质砂，仍具有较高的摩擦角。图 2 的 Datta 试验结果表明：虽然应力水平对钙质砂摩擦特性的影响很大，但其摩擦角仍大于石英砂的摩擦角，特别是在通常的基础工程的应力范围内尤为明显。石英的矿物摩擦角约为 23° ，而钙质砂的矿物摩擦角为 $31\sim 34^\circ$ ，且受剪时的剪胀性较小，因此，依 Rowe 理论可以认为钙质砂较高的摩擦角主要是由于颗粒间较大矿物摩阻的存在和颗粒破碎及重新排列的结果。钙质砂的体变特性与石英砂的明显不同。图 3 为常规三轴排水剪切试验中偏应力 q' 和体积应变 ϵ_v 随轴向应变 ϵ_x 的变化情况。在应力-应变关系方面，石英砂的初始模量要大

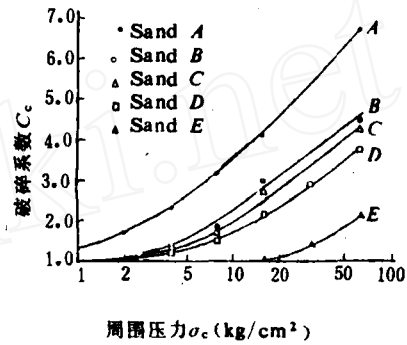


图 1 围压对破碎系数的影响

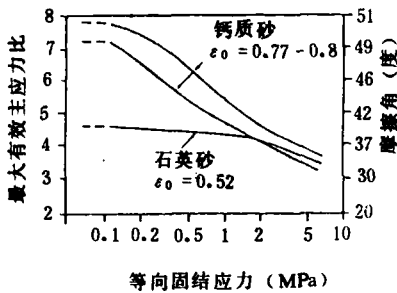


图 2 应力水平对摩擦特性的影响

于钙质砂，两者的剪切强度却相差不大。应该注意的是，该试验曲线是在试验室等围压条件下得到的，而现场的实际情况是，对于较密实的石英砂，其受剪后体积膨胀将会提高土体周围的应力及其强度，相反，由于颗粒破碎及体积剪缩的发生，钙质砂现场的平均应力将会下降，从而导致其强度的降低。

在相同的孔隙比条件下，即使土颗粒完全破碎。钙质土的摩擦角与其受剪前相比并无明显的差别。这说明土颗粒破碎本身不会直接明显地影响钙质砂的摩擦

特性。Dutt^[2]指出：等体积直接单剪试验所得的摩擦角比常规三轴试验的小50%，并认为受大变形的等体积直接单剪试验可提供钙质砂的最小排水摩擦角。分析其原因，可能是由于剪应力的施加，土颗粒破碎产生并发展，土体积有减小的趋势，因而使等体积试验中的法向应力明显降低所致。值得提到的是，这些从等体积直接单剪试验中得到的较

低的摩擦角，总是在由导管架平台钢管桩的抗拔试验及自升式平台插桩试验所得摩擦角的范围之内。这表明，等体积直接单剪试验所提供的应力状态与桩基工程中现场土的应力状态更为接近。

不排水条件下钙质砂三轴试验的应力路径和孔隙水压力的发展规律明显不同于普通的石英砂。在较低的围压条件下，孔隙水压力的变化量随应变的增加由正值过度到负值，而当围压增大到某一数值后，孔隙水压力的变化量将始终为正值，这种很高的正孔隙水压力将导致平均有效应力的明显降低。另外，Nambiar^[3]对印度西海岸CaCO₃含量为50%的粉质粘土进行的固结不排水三轴剪切试验结果表明：其不排水剪切强度 S_u 与先期固结应力 p' 之比 S_u/p' 高于具有相同塑性指数的正常固结非钙质粘性土的相应值。该作者还收集了世界各地其他一些钙质土三轴试验数据，但并未得到CaCO₃含量与 S_u/p' 之间统一量的关系，这可能是由于各地土的碳酸盐材料和组构不同所致。

胶结作用影响着钙质土的应力-应变关系，它提高了土的粘聚力，使土具有脆性，刚度和峰值强度增高，并引起应变软化现象。胶结的影响往往只反映在小应变的范围内，对较大应变下土的极限强度影响不大。

4. 压缩特性

因粒间孔隙的大量存在和颗粒的易破碎性，钙质土与同类的非钙质土相比具有较高的压缩性。钙质土较高的初始孔隙比 e_0 对其压缩特性具有重要影响作用，它直接决定着（1）某应力增量下的体积应变，（2）先期固结应力，（3）在达初始压缩段之前某应力下的压缩指数的大小。由于剪应力的影响，一维固结试验测得的压缩指数往往要比等向三轴固结试验的大。Nauroy^[4]的研究结果显示，钙质土的压缩指数在500~300kPa的平均有效应力作用下将达极限值，因此，他建议将压缩曲线上 $p=800kPa$ 处的斜率定义为极限压缩指数，并

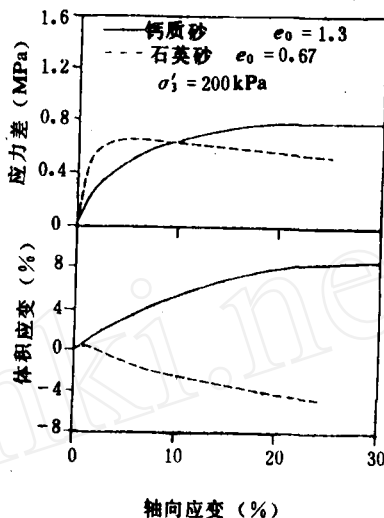


图3 q' 、 ϵ_v 与 ϵ_s 的关系

倾向于利用等向固结试验来确定压缩指数。

胶结作用对压缩特性的影响同样也反映在小应变范围内,对土的初始压缩曲线的斜率影响较小,但它使先期固结应力有增大的趋势,出现“拟超固结”现象,这种情况下钙质土的先期固结应力取决于初始孔隙比和胶结程度的大小。

5. 循环荷载下的强度特性

由于钙质土的压缩性较大,循环荷载往往产生很大的塑性应变,并使孔隙水压力上升,因而使土的强度和刚度有较大的衰减。这正是海洋工程中打入钢管桩承载力急剧下降的主要原因之一。

Morrison^[5]对南非近海同一地点两种碳酸钙含量不同的钙质砂 C_1 和 C_2 (C_1 的 $CaCO_3$ 含量为 80%, C_2 为 12~50%) 分别进行的等应力和等体积循环直接单剪试验结果显示:在等体积条件下,钙质土 C_1 任一最大应变 (20%) 对应的平均剪应力 τ 与第一周的最大剪应力 τ_{max} 之比仅在 20 周时就降低了 80~90%, C_2 约为 40%, 如图 4 所示。另外,在最大应变时的平均剪应力与竖向有效应力的应力路径图上,其应力状态大致呈直线关系,这表明不同周次时土的摩擦角基本保持不变。图 5 还说明上述剪应力比的降低,在等体积条件下要比等应力条件下更为明显。由于 (1) 等体积直接单剪试验中土的摩擦角保持不变、(2) 等体积试验不能将摩擦特性与正应力这两个因素的影响区分开来,而等应力试验可单独对摩擦特性的影响进行评估,因此,钙质土在循环荷载作用下强度的衰减主要是因土体剪缩引起的正应力降低而造成的。

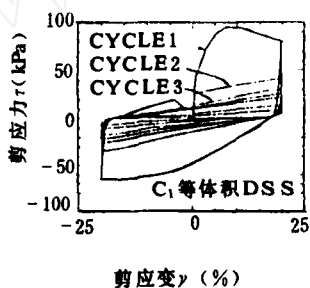


图 4 τ - γ 曲线

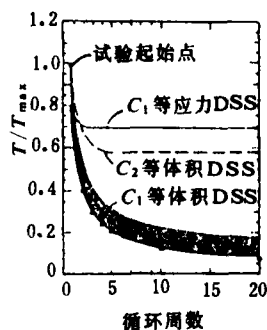


图 5 剪应力的衰减比较

四、结 语

由于钙质土特殊的沉积环境和组成,在荷载作用下,土颗粒间的胶结受到破坏,颗粒破碎发生,从而引起其物理力学性能的显著降低。经过多年研究和工程经验的积累,人们对钙质土的基本物理力学性质已有所了解,同时,诸如以下有关问题仍待进一步研究解决: (1) 现场及室内土工试验方法的选择, (2) 钙质土分类标准的确定, (3) 胶结作用及其影响, (4) 不同应力条件对钙质土性质的影响, (5) 动荷载条件下土的衰减特性。

参 考 文 献

- [1] Datta M. Crushing of calcareous sands during shear, Proc. 11th OTC, No. 3525, 1979
- [2] Dutt R. N. Friction of characteristics of calcareous sands from offshore Florida, Proc. , 18th OTC,

No. 5149, 1986

- [3] Nambiar M. R. M. The nature and engineering behavior of fine-grained carbonate soil from off the west coast of India, *Marine Geotechnology*, Vol. 6. No. 2, 1985
- [4] Nauroy J. F. Model test of piles in calcareous sands, Proc. ,ASCE conference on geotechnical practice in offshore engineering, 1983
- [5] Morrision M. J. Laboratory test results of carbonate soils from offshore Africa, proc. ,international conference on calcareous sediments, Vol. 1, 1988

www.cnki.net