

南海海洋沉积物力学性质研究进展

戴少军（中海油田服务股份有限公司（物探事业部工程勘察作业公司），天津 300450）

摘要：海洋开发与海洋战略发展关系到一个国家的前途，我国作为一个海洋大国，合理开发我国南海将为人民带来福祉，国家海洋强国战略和“一带一路”的进行也离不开南海的开发。而对于南海海洋沉积物力学性质的研究直接影响到南海资源的开发和南海海洋工程的建设。南海沉积物来源复杂，主要来源于亚洲大陆、南海周边岛屿、通过台湾海峡运移来的东海沉积物、自生矿物和深海火山碎屑。大量学者对南海海洋沉积物力学性质进行了大量的土工试验。研究表明南海沉积物具有高含水率、高压缩性、低密度等一系列特征。主要由黏土和砂组成，其力学性质受沉积物内黏粒含量、孔隙度、含水率、饱和度等因素影响。近些年，随着南海天然气水合物的开发热潮，南海天然气水合物沉积物的力学性质的研究也越为急迫。沉积物表现为高孔隙度、高含水率、低密度、高压缩性等特征。研究表明，南海天然气水合物沉积物的力学性质，受水合物饱和度、有效围压、温度等因素影响。由于水合物的胶结作用沉积物峰值强度得到了有效提升，而且沉积物的峰值强度也随有效围压的升高、温度的降低而增加。

关键词：南海；沉积物；力学性质；水合物

0 引言

海洋是生命的摇篮，其面积占地球总面积 71%，蕴含着巨大的财富。我国南海油气矿产资源和生物资源丰富，具有广阔的开发前景。并且随着近年来我国海洋强国战略的提出，对于海洋的研究和开发成为了当下的热门。在南海开展与海洋相关的研究和开发建设，就必须了解海洋沉积物的相关力学性质^[1]。为了得到南海海洋沉积物的静力学、动力学性质，许多研究机构和学者利用三轴试验仪等各种设备和数值模拟的方法对南海沉积物进行了大量的研究。值得注意的是，随着近几年天然气水合物在南海的研究与开发，对天然气水合物沉积物的力学性质研究成为了水合物开发的重要环节。探明天然气水合物沉积物的力学性质与破坏机理，对能否实现天然气水合物的商业化开采起到至关重要的作用。

1 矿物来源及组成

南海是西太平洋最大的边缘海，其沉积物来源复杂，记录了南海古海洋演化、东亚季风演化和区域构造演化等重要信息^[2]。Tamburini 等人对南海北部部分地区的研究表明，沉积物主要来源于亚洲大陆、南海周边岛屿以及通过台湾海峡运移而来的东海沉积物等。对于深海区域，自生矿物和深海火山碎屑矿物对沉积物组成具有较大影响。Liu 等人认为在南海东北部陆坡部分，来自于台湾岛以及长江源的物质对沉积物具有重要影响。并且伊利石和绿泥石由台湾岛和长江源物质提供，吕宋岛和印支半岛提供了蒙脱石，高岭石矿物主要由珠江提供。

近年来，随着国家海洋战略的部署，对于南海东部以及南部的研究也得到了大力支持。其中，使用矿物学方法和同位素地球化学方法对南海东部沉积物进行了研究。由于此海域水深较大，排除物质后沉积物中仍含有较高的自生沉积矿物和火山碎屑物质。杨群慧等人的研究表明来源于台湾海峡和台湾岛的重矿物多处于深度较大的东北部陆坡区域，剥蚀物来源于吕宋岛并经由巴士

海峡进入此区域，但珠江物质对此区域影响较小。乔培军通过对南海西南部的调查研究表明，该地区沉积物主要来源于湄公河的陆源碎屑。总体来说南海各地区沉积物来源相对明确，但由于南海区域复杂的地理及洋流特征，沉积物的来源研究仍然充满不确定因素，沉积物各物源地区对南海各部分的贡献程度仍需要通过进一步的调查研究来明确。在进行此研究时，要建立以矿物、元素和同位素体系为判别指标的物源综合分析方法，识别出沉积物中各主要粒级组分所蕴含的物源信息，确定沉积物物质来源与扩散机。

岁鸿禧通过对南海海洋沉积物进行 X 光衍射和联合热分析等方法，测定了南海涠洲岛、南沙群岛和海南岛地区的海洋土矿物组成，表 1。

表 1 南海部分地区沉积物矿物组成

土样地点	主要粘土矿物	主要非粘土矿物
海南岛	伊利石、绿泥石、高岭石、云母	石英
南沙群岛	伊利石、绿泥石、高岭石	石英、方解石
涠洲岛	伊利石、云母、绿泥石	石英、长石、菱铁矿和水合氧化铁

从上述可以看出南海地区主演黏土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石，主要非黏土矿物为石英。

2 沉积物分类

根据特定分类原则将区域内的沉积物分为三大类：

①陆源碎屑沉积：砂质砾、砾质砂、含砾砂、泥质砂、砂质泥、泥；

②生物碎屑—陆源碎屑沉积：含钙质生物泥、钙质生物泥、硅质生物泥、含钙质硅质生物泥、含硅质钙质生物泥、含钙质生物砂质泥、硅质钙质生物泥、硅质钙质生物砂质泥、含钙质生物含砾泥、钙质生物泥质砂、含硅质生物粘土、含钙质生物粘土、含硅质含钙质生物粘土；

③生物碎屑沉积：贝壳珊瑚碎屑砂。

3 南海海洋沉积物力学特性

随着国家海洋强国战略的推进，国家对于海洋资源开发和海洋工程建设越发重视，海洋岩土工程的发展也越发急迫。有关部门、研究机构和学者们进行了大量的海洋调查，大量的岩土试验，为开发我国南海这个资源宝库提供了重要的支撑。

对于南海深海底部沉积物普遍表现为高压缩性，且力学性质受含水率、孔隙度等因素的影响。朱超祁等人对南海北部陆坡沉积物的物理力学性质进行了研究。区域内广泛分布粉砂质砂、砂质粉砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土和砂—粉砂—黏土，平均含水率为 101.39%。区域内沉积物天然密度为 $1.79\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，其中粉砂质砂的密度最 $1.93\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，沉积物密度与粘粒含量呈负相关关系。而孔隙比与黏粒含量呈正相关关系，并与沉积物结构、排列、密实程度等性质密切相关。研究区域沉积物表现为高压缩性，且压缩性与黏粒含量呈正相关关系。区域内粉砂质砂、粉砂质黏土、黏土质粉砂的十字板剪切抗剪强度分别为 12.7kPa、15.43kPa、16.57kPa，主要由于黏粒含量的增高提高了沉积物的抗剪强度，同时贯入阻力也受到黏粒含量的影响。

陈聪等人利用三轴试验的方法对南海深海海底沉积物进行力学试验。研究结果表明，沉积物的力学性质与陆地上半脆性黏土相近，且破坏应力值与含水率、孔隙度相关，含水率 40%–45%、孔隙度 50%–55% 时破坏应力得到最大值。蒋明镜等人对南海软土力学性质进行了试验研究。黏土具有高孔隙比、高含水率、高饱和度等特点。土体为高压缩性欠固结黏土，固结试验表明土体具有一定结构性。在固结不排水三轴试验中，呈现应变硬化特征，且破坏是呈现鼓腰状特征。

对于钙质沙、海滩岩、储层岩、珠江口盆地沙土等不含粘粒或粘粒较少的沉积物，表现为脆性破坏。汪轶群等人对南海钙质砂的破坏特性进行了研究。研究结果表明粒径大于 2mm 的大粒径砂和粒径小于 0.5mm 的小粒径砂表面较为光滑轮廓接近于圆，而对于粒径介于 0.5–2mm 之间的中间粒径砂而言，表面棱角多形状不规则。对沉积物进行三轴排水剪试验，发现剪切过程中沉

积物发生了破碎，粒径分布向着级配均匀的方向发展，且随着有效围压的增大，沉积物的破碎程度也增大但土体的剪胀程度降低。

朱长歧等人对南海海滩岩的力学性质进行了研究。结果表明，海滩岩具有低密度、高孔隙率、渗透性高等特点。处于风干状态下的海滩岩的单轴抗压强度为 2.02–19.39MPa，而饱和会使此参数降低，而其抗拉强度为 0.64–2.52MPa。密度和胶结程度的提高将增高其抗压强度，然而孔隙率和粒径对单轴抗压强度影响不大。张勇等人对南海西部的低孔超低渗储层岩进行了力学试验研究。应力应变结果显示岩石破坏时应变小于 1%，呈现典型脆性破坏。

侯红明等人对南海珠江口盆地贝壳砂的力学性质进行了研究，对沉积物进行三轴不排水剪切试验和直剪试验。直剪试验结果，贝壳砂的内摩擦角 30° – 39° 间，三轴试验结果，内摩擦角 34.6° 。贝壳砂表现为较高的压缩性，决定了贝壳砂在压缩状态下很难达到稳定。通过贝壳砂进行动三轴试验结果可以得出，贝壳砂抗液化能力较强，具有较高稳定性，抗地震烈度达到 7 度，当地震烈度达到 8 度时也只有 4.5m 以下砂土会发生液化^[1]。

李飒、刘剑涛等人对南海迭层土的力学特性进行了研究。通过对沉积物进行孔压静力触探 CPTU 试验发现迭层土力学性质与单一层土差异较大，迭层土摩阻比于 0–8 之间变化，变化范围远大于一般砂土和黏土。对迭层土进行不固结不排水试验发现其不排水强度为 CPTU 的下限。

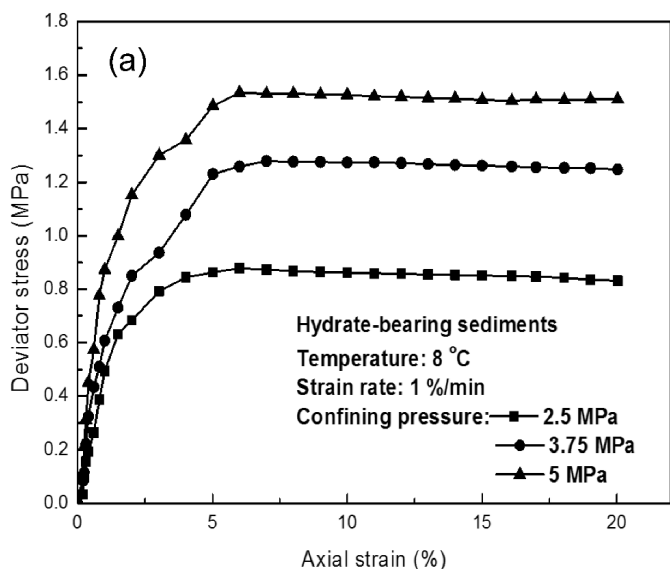
从上述可以看出，南海海洋沉积物密度与粘粒含量呈负相关关系，孔隙比与黏粒含量呈正相关关系，并且沉积物的力学性质与陆地上半脆性黏土相近，且破坏应力值与含水率、孔隙度相关。另外南海海洋黏土具有高孔隙比、高含水率、高饱和度等特点，南海海洋土体为高压缩性欠固结黏土，且具有一定结构性。在固结不排水三轴试验中，南海海洋土体呈现应变硬化特征，且破坏是呈现鼓腰状特征。

4 南海含水合物沉积物力学性质

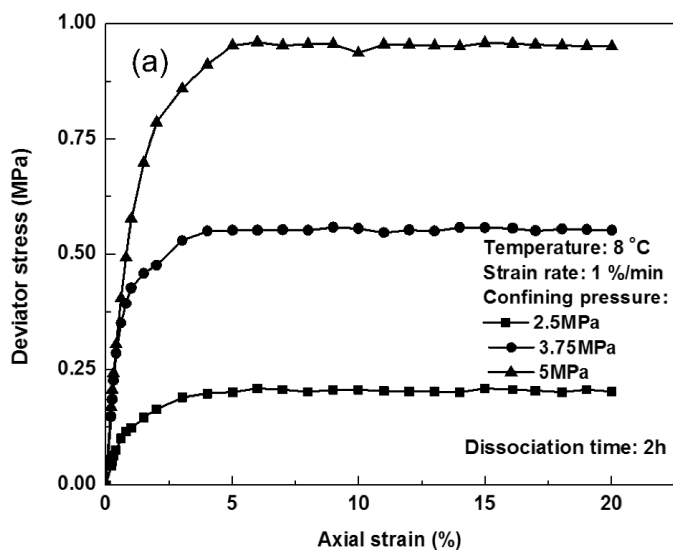
相比较于南海不含水合物沉积物，目前关于我国南海天然气水合物沉积物的力学性质的研究仍处于起步阶段，需要大量的研究支撑水合物的安全有效开采。需要大量的实验数据得到水合物沉积物的力学性质并阐明变形机理建立合理有效的本构模型。

研究表明含水合物的南海海洋土沉积物受到水合物饱和度、孔隙度、温度、含水率等因素的影响。Luo 等人使用天然气水合物混合制样法制作了南海海洋土重塑样，并对其进行静三轴试验。通过对南海海洋土和高岭土进行粒径分析，发现海洋土的粒径分布于高岭土较为接近，均为砂质粘土。利用同样的方法制作相同孔隙度相同饱和度的海洋土重塑样和高岭土重塑样，并对其进行三轴试验，发现两者的力学性质相近。在相同围压情况下含水合物沉积物的强度大于含冰沉积物的强度，表

明水合物的存在增强了黏土颗粒之间的胶结作用。分解导致了沉积物强度的降低,并通过绘制摩尔库伦曲线发现水合物的胶结作用在沉积物强度上起到了重要的作用。



(a₁) 水合物沉积物分解前应力应变曲线



(a₂) 水合物沉积物分解 2h 后应力应变曲线

图 1

关进安等人使用神狐海域细沙沉积物在力学测试平台中原位生成了水合物沉积物试样,并进行了一系列三轴试验。发现试样的峰值强度在 2℃时随围压上升先减小后增大,5℃时随围压上升先增大后减小;同时 2℃时试样的弹性模量比在 5℃时更大。说明天然气水合物沉积物在低温高压环境下具有较高的强度,并展现弹塑性特征^[4]。张怀文等人制作了黏土质粉砂沉积物试样,对其进行了不同饱和度和不同有效围压的三轴试验。试验结果表明,水合物饱和度的上升使水合物沉积物的抗压峰值强度得到了增加,但饱和度的变化对沉积物的刚度和泊松比影响并不明显。随着有效围压的上升,水合物

沉积物的峰值强度线性提升,而泊松比与有效围压没有明显的函数关系。通过对应力应变曲线进行分析,发现沉积物试样无明显的峰值强度和压密阶段,应力应变曲线呈现应变硬化特征,弹性阶段较短,屈服阶段较长。并根据实验数据建立了黏土质粉砂水合物储层强度准则。巍巍对南海水合物矿区海底浅层沉积物进行了室内土工试验。发现沉积物具有高含水率(87.1%~134.7%)、高孔隙比、低密度及高塑性等主要特征,其抗剪强度很小,压缩系数 1.5~3.7 均大于 0.5,为高压缩性土。这是由于浅层沉积物所处环境造成的,沉积物在相对稳定的环境中仍未经历压实排水阶段,同时高黏粒含量降低了孔隙水渗透率,进一步阻止了沉积物的排水过程。沉积物常处于软塑态,一经扰动容易转变成流塑态^[5]。

水合物分解明显降低沉积物的强度。Wang 等人对南海珠江口盆地水合物沉积物进行了研究。图 1 为文中南海水合物沉积物应力应变曲线。结果表明水合物的分解将降低沉积物的峰值抗剪强度,表明在水合物开发过程中,水合物分解有造成海底滑坡、平台塌陷的风险^[4]。

从上述可以看出,南海海洋土和高岭土较为接近,均为砂质粘土。南海海洋沉积物具有高含水率、高孔隙比、低密度及高塑性等主要特征。水合物的存在增强了南海海洋黏土颗粒之间的胶结作用。水合物分解将降低沉积物的峰值抗剪强度,并导致了沉积物强度的降低。表明了在水合物开发过程中,水合物分解有造成海底滑坡、平台塌陷的风险。

5 展望

南海是我国最重要的战略中心、资源宝库,也是我们子孙后代留下的宝贵财富。南海的合理开发需要各类信息的充分保障,无论是开发南海自然资源,还是在南海进行工程建设,都需要开发人员对南海沉积物力学性质的充分了解。但如今南海的开发和建设仍面临着各种难题,关于南海海洋沉积物的各类研究仍需要各机构各学者的努力付出。国家海洋强国战略将有力支撑南海的开发,相信未来将会有更多的人将会由陆地转向海洋,并参与到南海海洋沉积物的研究中,参与到南海的开发建设当中。

参考文献:

- [1] 陈聪,龙建军,李赶先.南海深海海底沉积物力学性质试验研究[J].海洋工程,2015,33(4):108-114.
- [2] 尹松,张先伟,孔令伟,等.海洋沉积土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J].岩土力学,2015(s1):459-464.
- [3] 蒋明镜,李志远,黄贺鹏,等.南海软土微观结构与力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(s2):17-20.
- [4] 关进安,卢静生,梁德青,李栋梁,万丽华.高压下南海神狐水合物区域海底沉积地层三轴力学性质初步测试[J].新能源进展,2017(01):40-46.
- [5] 巍巍.南海中沙天然气水合物资源远景区海底沉积物的物理力学性质研究[J].海岸工程,2006(3):33-38.