

文章编号: 1000-7598-(2005)07-1029-04

颗粒级配和结构对粉砂力学性质的影响

王淑云¹, 鲁晓兵¹, 时忠民²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国海洋石油总公司, 北京 100027)

摘要: 分析了几组原状、重塑和配制土样的静三轴试验结果, 认为颗粒级配和结构性是影响粉砂应力-应变关系和强度特性的两个主要因素。当颗粒级配不同时, 结构性原状粉砂土样和不具有结构性的配制土的强度均不同。相同颗粒级配的原状和重塑粉砂的强度也不同。而颗粒级配稍有不同的一种配制粉砂与原状粉砂在应力-应变关系和强度特性方面相接近。此种配制粉砂可替代原状粉砂做为模型试验用土。

关键词: 粉砂; 颗粒级配; 结构性; 强度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands

WANG Shu-yun¹, LU Xiao-bing¹, SHI Zhong-min²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. China Ocean Oil Corporation, Beijing 100027, China)

Abstract: The triaxial compression test results of undisturbed, remolded and reconstituted samples are analyzed. The grain-size distributions and the structure are considered to be two main factors which influence the stress-strain and strength behavior of silty sands. When the grain size distributions are not the same, not only the undisturbed samples with structure but also the reconstituted samples with non-structure are not similar in strength. The strength of remolded samples which have the same grain-size distributions as the undisturbed samples are different from that of the undisturbed samples. The stress-strain relationship and strength behaviors of one of reconstituted silty sands are very similar to those of the undisturbed samples although their grain-size distributions are different. This kind of reconstituted silty sand can substitute for the undisturbed silty sand in the model test.

Key words: silty sand; grain-size distribution; structure; strength

1 引言

土的结构性是指土颗粒的排列特征、连接形式以及土的孔隙性状等土的微观结构特性。大多数自然沉积的天然土都有一定的结构性。一般来讲, 粘土的结构性更强一些, 因此, 国内外对粘土结构性的研究工作比较多^[1, 2]。但砂性土也有结构性^[3], 尤其是夹杂一定粘土、粉土和有机物的砂土^[4]。目前, 有关这种粉质砂土结构性研究的文献鲜见报道^[5]。

随着我国海洋油气资源的大力开发和降低石油开发成本的需要, 考虑到桶形基础具有经济、方便和重复使用的优点, 我国计划近期在渤海辽东湾地区建造桶形基础平台。在此海域海底5~30 m深

度内分布着大量的粉砂, 这种砂夹杂着一些块状和条状的粘土、粉土团。另外, 还有少量的碎贝壳。为了给工程设计提供可靠的桶基承载力计算和变形分析方法, 需要进行桶基模型试验和离心机试验^[6], 因此, 需要大量的土来模拟实际场地地基土。严格来讲, 理想的模型试验用土应该取自实际平台场地地基原状土, 但由于海上钻孔取样费用高, 无法获得这么多的原状土, 所以, 试验用土只能用配制的土。对于配制土, 不仅要求其现场原状土的物理和力学特性相接近, 而且应具有很好的重复使用性。

在上述工程背景和模型试验研究要求下, 对渤海LD场地的部分原状土和重塑土, 以及一些具有不同颗粒级配的配制土, 进行了一系列物性和静三轴

收稿日期: 2004-01-09

修改稿收到日期: 2004-05-28

基金项目: 中国科学院知识创新十~五重大项目和中国海洋石油总公司资助项目(No.KJCX-SW-L03)

作者简介: 王淑云, 女, 1965年生, 学士, 高级实验师, 现从事土力学实验研究工作。E-mail: sywangu@imech.ac.cn

试验。比较了具有不同颗粒级配的原状粉砂、相同颗粒级配的原状和重塑粉砂、不同颗粒级配的配制土的应力-应变关系和强度等力学特性,并分析了颗粒级配和结构性对土的力学性质的影响。最后,确定了一种配制的混和粉细砂为桶基模型试验用土。

2 试验结果和分析

2.1 现场土概况和原状土的性质

从渤海辽东湾 LD 场地的三个钻孔资料来看, 5~20 m 范围为中密~密实的粉砂或砂质粉砂, 并夹杂一些碎贝壳、分散的粘土细层等^[7]。根据桶形基础的尺寸分析, 0~20 m 范围内的土对桶形基础承载力的影响最大, 因此, 是主要的研究对象。另外, 考虑到桶形基础模型试验计划只采用一种均匀的土, 而现场 0~5 m 范围内的土大多很软、强度很低, 因此, 5~20 m 范围内的土为模型试验用土的重点模拟对象。

LD 场地三个钻孔在 5~20 m 之间不同深度处土的颗粒级配不同, 即使同是粉砂, 其颗粒曲线也不尽相同, 有的相差还很大。通过对现场土性资料的分析, 深度在 12~15 m 范围三个钻孔的 4 个原状土样(No.1~No.4)非常具有代表性, 它们的颗粒曲线如图 1 所示。钻孔 LD5-2-2 的两个土样(No.3, No.4)颗粒级配均匀且颗粒粒径较小(小于 0.15 mm), 细砂含量较少。钻孔 LD10-1-2 土样 No.2 的颗粒级配不均匀且粒径较大(小于 1.0 mm), 砂粒含量较大。钻孔 LD10-1-3 土样 No.1 的颗粒曲线基本介于上述两颗分曲线之间(粒径小于 0.4 mm)。4 个土样基本情况如表 1 所示。因为土样的三轴固结排水试验(简称 CD 试验)是在两种围压条件下完成的, 为了便于比较, 土样的应力以归一化应力比($\sigma_1 - \sigma_3$)/ σ_3 形式表示。原状土样的应力比-应变和体变-应变关系如图 2 所示。

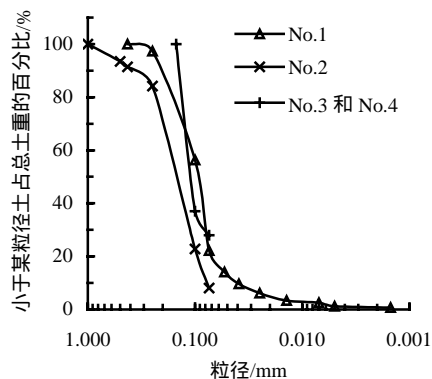
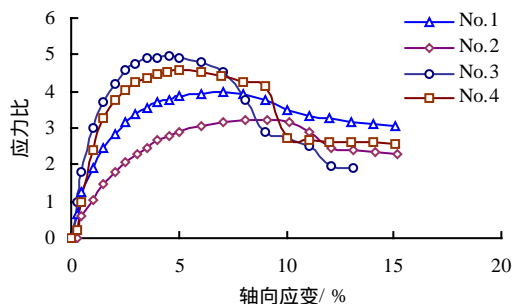


图 1 原状土的颗粒级配曲线

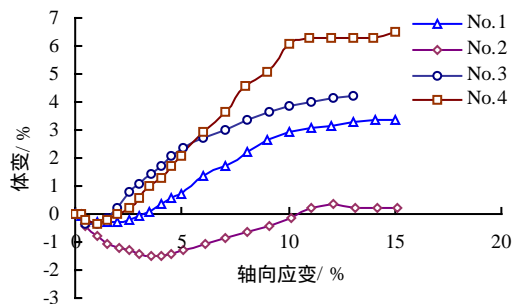
Fig. 1 The grain size distribution curves of undisturbed samples

表 1 原状土样的基本情况

土样编号	钻孔号	深度 / m	含水量 / %	密度 / g · cm ⁻³	土样描述	围压 / kPa
No.1	LD10-1-3	12.3	22	2.00	褐灰色中密砂质粉砂	100
No.2	LD10-1-2	14.3	23	1.94	褐灰色中密粉砂	400
No.3	LD5-2-2	14.2	22	1.98	褐灰色密实粉砂	100
No.4	LD5-2-2	14.3	20	1.98	褐灰色密实粉砂	400



(a) 应力比-应变关系



(b) 体变-应变关系

图 2 原状土的 CD 试验结果

Fig.2 CD test results of undisturbed samples

试验结果表明: 4 个原状土样均表现为脆性破坏, 剪切时有较明显的剪胀行为; 但不同土样的应力比-应变、体变-应变关系有所不同。这主要是由于土样颗粒级配不同以及土样中存在不同程度的粘土夹块或夹层引起的。LD5-2-2 两个土样均为密实~很密实的粉砂, 细砂粒含量较多。因此, 不仅土样的最大应力比值较大, 有效内摩擦角较高。而且土样在剪切过程中, 随着应变加大, 应力比值上升较快, 达到最大值后, 其下降也较快, 呈现明显的脆性破坏行为, 剪胀也较明显。

根据以上 4 个代表性原状土样的应力比-应变、体变-应变关系的分析结果, 可以认为, 原状土样 No.1(砂质细砂)基本上代表了 4 个原状土样的平均力学特性, 因此, 它是桶基模型试验用土的主要模拟对象。

寻找颗粒级配和力学性质均与原状土非常接近的重塑土或配制土, 实际上是不可能的, 除非原状土不具有结构性。虽然可以用加长固结时间或添加其它化学物质的方法使重塑土或配制土部分模拟

原状土的结构性,但这些方法缺点也很多,如试验周期长,颗粒与添加物之间物理和化学作用复杂等问题。因此,只能要求配制土与原状土样的颗粒级配和力学性质尽可能相同或接近。

配制土时,首先应寻找与颗粒级配接近的土,然后考虑原状土的结构性对力学性质的影响,适当调整配制土的颗粒级配。为此,我们先找到一种与原状土定名相似的细砂和一种含粉粒和粘粒较多的粉质粘土,然后,分别研究它们的应力-应变、体变-应变关系和强度特性。将细砂、粉质粘土以及粉砂(细砂和粉质粘土以 1:1.2 比例混和,这个比例是分析和比较原状土、重塑土以及配制粉质粘土、细砂的结果)与原状土样的静力学性质进行比较,最后得出结论。

2.2 重塑和配制土的力学性质分析

原状土样 No.1 经烘干、揉碎和搅拌均匀后,按照原状土样的干密度 1.6 g/cm^3 ,制成重塑土样 No.6。重塑土样与原状土样的颗分曲线相同,参见图 1 中的 No.1 曲线。重塑土样经过饱和,再进行 CD 试验。

三种配制土 No.7~No.9 的颗分曲线见图 3。No.7 为粉质粘土,其细粒含量较高。No.8 为细砂,不含粘粒和粉粒。No.9 为粉砂,由 No.7 和 No.8 以 1:1.2 的比例混合而成。土的分类和基本参数如表 2。配制土也按照干密度 1.6 g/cm^3 制样,然后经过饱和,再进行 CD 试验。

图 4 为原状土样(No.1)、重塑土样(No.6)以及三种配制土(No.7~No.9)的 CD 试验结果。根据土的颗分曲线和应力-应变、体变-应变关系曲线,颗粒级配和结构性对土的力学性质的影响分析如下。

(1) 原状土与重塑土的应力-应变、体变-应变关系明显不同。从应力-应变关系来看,虽然它们均呈脆性破坏,但后者比前者强度低 30%。从体变-应变关系来看,原状土呈现较明显的剪胀行为,而重塑土的剪胀行为则不明显。原状和重塑土力学特性的不同主要是由于土的结构性引起的,而原状土的结构性主要是由于土中粉粒和粘土的夹层和夹块造成的。原状土历经了迁移、沉积和固结等自然过程,土颗粒之间、土与孔隙水之间形成了特有的联接形式,尤其是粉粒和粘粒的存在及不均匀的分布,使得这种砂质粉砂的结构性比砂土高,比粘土低。这种结构性使得原状土体具有一定的结构强度,在应力水平较低,土的结构得以保持完整的条件下,土体表现出较高的强度。而对于重塑土样,虽然它的颗粒级配与原状土相同,但其中的砂粒,粉粒和

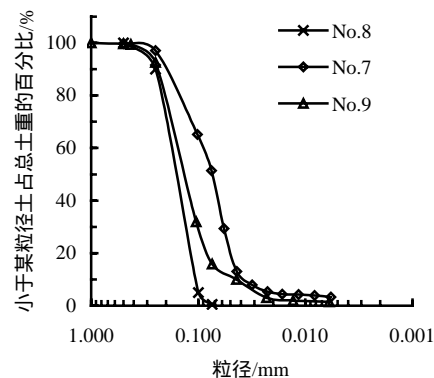


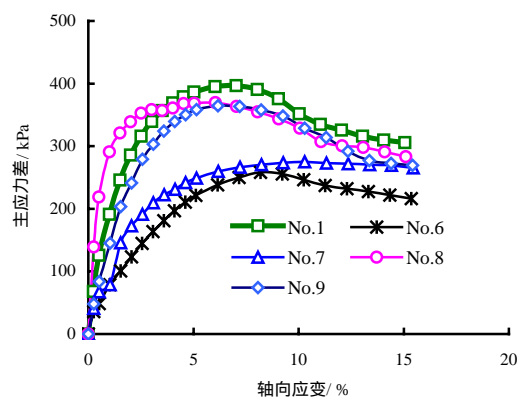
图 3 配制土的颗粒级配曲线

Fig. 3 The grain size distribution curves of reconstituted samples

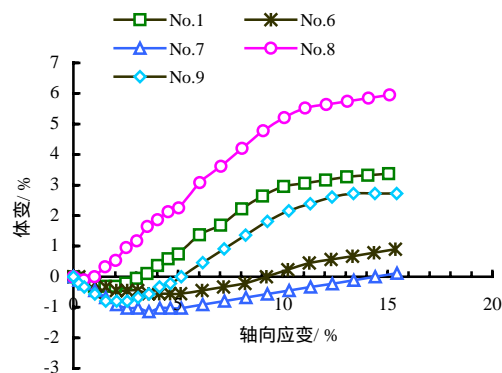
表 2 重塑土和配制土的基本情况

Table 2 Basic information about remolded and reconstituted samples

土样编号	来源	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	土样描述	围压 / kPa
No.6	重塑土	1.6	褐灰色中密砂质粉砂	100
No.7	配制土	1.6	棕黄色中密粉质粘土	100
No.8	配制土	1.6	白色密实细砂	100
No.9	配制土	1.6	浅棕色中密粉砂	100



(a) 应力-应变关系



(b) 体变-应变关系

图 4 原状、重塑和配制土的 CD 试验结果比较

Fig. 4 The comparison of CD test results among undisturbed, remolded and reconstituted samples

粘粒是均匀分布的,颗粒之间的连接作用也大大减弱了。换句话说,土体的原有结构性遭到破坏,因此,重塑土的强度明显降低。

(2) 三种配制土的应力-应变、体变-应变关系不同。粉质粘土的粘粒含量最高,其强度最低,而且表现为塑性破坏形式,基本上无剪胀行为。细砂与粉砂的强度值基本相等,均为脆性破坏;但前者在较小应变时就达到应力峰值,其剪胀性也较后者大。这主要是由于细砂中不含粘粒和粉粒,所含砂粒均匀,在剪切过程中,砂密实到一定程度后,便出现剪胀,而且剪胀明显。

(3) 三种配制土与原状土的比较情况如下:配制粉质粘土与原状土的应力-应变、体变-应变关系明显不同:前者为塑性破坏,后者为脆性破坏;前者比后者强度低 25%,而且基本无剪胀。配制细砂与原状、重塑土的应力-应变、体变-应变关系明显不同。

配制细砂与原状土的强度较为接近(仅低 10%),但其破坏应变值较小(前者为 5%,后者为 7%),其剪胀性也较后者大。

配制粉砂与原状土的强度值接近,应力-应变、体变-应变关系也很一致。这主要是配制粉砂综合考虑了土的颗粒特性及级配对土性的影响。配制的粉砂中所含细砂的强度较高、所含粉质粘土的强度较低,而且配制粉砂比原状土的砂粒含量多 20%左右,这样,配制粉砂在强度方面比重塑土有所提高,从而弥补了因重塑土缺乏结构性造成的土的强度降低。

在桶形基础模型和离心机试验中,土体在外载作用下是否具有剪胀行为对动载下桶基的承载力和试验结果影响很大。从上述不同土样的应力-应变和体变-应变试验结果分析,重塑砂质粉砂和配制的细砂、粉质粘土在强度和剪胀性方面均不能较好地反映原状砂质粉砂的性质,因此,用它们作为模型试验用土是不合适的。而配制的粉砂不但在强度方面接近原状土,在剪胀性方面也与原状土很接近,所以,可以用配制的粉砂来代替原状砂质粉砂进行模型试验。

3 结论

通过分析渤海 LD 场地 4 个原状土样,1 个原状土的重塑土样以及三种配制土样的颗粒组成和力学性质分析,得到如下几点主要结论:

(1) 颗粒级配稍有不同的原状砂质粉砂或粉砂的力学性质有差别,主要原因是颗粒级配不同以及

土结构性的差异。

(2) 具有相同颗粒级配的原状与重塑砂质粉砂的力学性质相差较大,主要原因在于颗粒分布不同,原状土样具有结构性,而重塑土样没有结构性。

(3) 三种配制土的应力-应变,体变-应变关系均有所不同,主要原因是土样的颗粒级配不同,尤其是砂粒和粘粒的含量不同。

(4) 配制的粉砂与原状砂质粉砂的应力-应变,体变-应变关系和抗剪强度值很接近,可以代替原状砂质粉砂进行桶基模型试验。

参考文献

- [1] 龚晓南,熊传祥,项可祥等.粘土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J].水利学报,2000,(10):43-47.
GONG Xiao-nan, XIONG Chuan-xiang, XIANG Ke-xiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2000, (10): 43 - 47.
- [2] 蒋明镜,沈珠江.结构性粘土剪切带的微观分析[J].岩土工程学报,1998,20(2):102-108.
JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Microscope analysis of shear band in structured clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 102 - 108.
- [3] Lee K L. Adhesion bonds in sands at high pressure[J]. **Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1997, GT8: 908 - 1 013.
- [4] Dyvik R, Høeg K. Comparison of tests on undisturbed and reconstituted silt and silty sand[A]. **Physics and Mechanics of Soil Liquefaction**[C]. Rotterdam: Balkema A A, 1999. 159 - 167.
- [5] Kim S I, Jeong S S, Park K B, et al. The effects of plastic fines on limited liquefaction under monotonic loading[A]. **Proceedings of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**[C]. Istanbul: [s.n.], 2001. 163 - 166.
- [6] 鲁晓兵,郑哲敏,张京来.海洋平台吸力式基础的研究与进展[J].力学进展,2003,33(1):27-40.
LU Xiao-bing, ZHENG Zhe-min, ZHANG Jin-lai. Progress in the study on the bucket foundations of offshore platform[J]. **Advances in Mechanics**, 2003, 33(1): 27 - 40.
- [7] 王淑云,鲁晓兵,时忠民等.渤海旅大场地土的静力学性质及模型参数的确定[R].北京:中国科学院力学研究所,2003.