

文章编号:1002-3682(2015)04-0023-10

## 黄河口海底液化粉土特征研究<sup>\*</sup>

马彬彬,孙永福,胡光海,宋玉鹏,董立峰,刘晓瑜,曹成林

(国家海洋局第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

**摘 要:**选取黄河口埕岛油田海域作为研究区,在先前调查研究工作的基础上对该区域海底液化粉土特征进行研究,从声学特征、物理力学参数特征、微结构特征以及动三轴试验分析这 4 个方面详细分析了液化粉土与未液化粉土的性质差异。研究表明,液化粉土的物理力学性质相对于未液化粉土有着明显的变化,液化粉土的标贯击数值较未液化粉土增加,在相同的振次条件下,液化粉土的抗液化剪应力比比未液化粉土大,土的抗液化强度增加,液化粉土较未液化粉土更难发生液化。

**关键词:**黄河口;液化粉土;抗液化强度

**中图分类号:** P642;TU41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2015.04.003

根据《岩土工程勘察规范》<sup>[1]</sup>规定:粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量不超过 50%,且塑性指数等于或小于 10 的土,应定名为粉土。粉土主要由细砂粒、粉粒和黏粒三种颗粒构成,其粒组成分中,0.005~0.075 mm 的粉粒占绝大多数。在某些方面粉土像砂土一样表现出易液化的特征,海底浅表层粉土在波浪循环荷载作用下则会发生液化。

调查研究表明<sup>[2-6]</sup>,黄河口海底分布着大量的已液化粉土,其典型的特征是液化粉土内部无明显层理或层理不清,沉积结构杂乱,与周围层理清晰的未液化粉土形成鲜明的对比,利用高分辨率浅地层剖面探测是分辨液化粉土与未液化粉土的主要途径。相对于未液化粉土,液化粉土含水量减小、容重增大、孔隙比减小、密实度增大,土体强度显著提高<sup>①</sup>,因此形成了黄河口海底以粉土为主、厚度不等的“铁板沙”,由于这种沉积物结构紧密,强度较大,一般都难于清淤开挖,对海底工程施工带来很大难度,在该区域油田海上平台建设、海底管线路由铺设施工过程中都带来了诸多不便。前人在对黄河口海底粉土开展研究时,并未将此种性质差别显著的液化粉土与未液化粉土进行区分,本文将选择黄河口埕岛油田海域作为研究区,在前人调查研究工作的基础上对该区域海底液化粉土特征进行研究,对比液化粉土与未液化粉土的性质差异。

本文搜集了研究区 42 个地质钻孔资料(钻孔来源为埕岛油田平台与路由勘察报告和埕岛油田灾害地质研究报告),通过前人的高分辨率地球物理探测资料解译,将钻孔分为

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-06-29

资助项目:海洋公益性行业科研专项——近海海底地质灾害预测评价及防控关键技术研究(201005005)

作者简介:马彬彬(1993-),男,硕士研究生,主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail:mbb7298@163.com

(王 燕 编辑)

① 孙永福,宋玉鹏,胡光海,等. 埕岛油田灾害地质研究成果报告,国家海洋局第一海洋研究所,2006.

液化粉土与未液化粉土,对其物理力学性质分别统计分析,总结了黄河口液化粉土的物理力学参数特征;利用扫描电镜观察了液化粉土与未液化粉土的微观结构差异;并通过动三轴试验分析了液化粉土与未液化粉土的抗液化剪应力比,对两者的抗液化强度进行了比较,为今后液化粉土与未液化粉土的深入研究奠定了基础。

## 1 研究区域概况

研究区位于黄河口埕岛油田海域(图1),此区域是埕岛油田的主力采油区块。1855年,黄河于河南兰阳铜瓦厢决口夺大清河入渤海,所携带的大量泥沙淤积在河口,填海造陆形成现代黄河三角洲。1855年至今,黄河曾10次大改道,每一次改道都形成一个新的亚三角洲。埕岛油田海域则位于现代黄河三角洲的水下三角洲之上,地势西南高,东北低。该区主要是1964—1976年刁口流路走河期间形成的亚三角洲堆积体。1976年黄河尾闾改道清水沟流路后,本区泥沙来源断绝,在风浪和海流作用下原三角洲体系受到侵蚀,近岸水深加大,岸线急剧后退,局部地段因人工防潮堤的修筑,岸线保持稳定,但近岸段海底一直处于冲刷侵蚀状态。

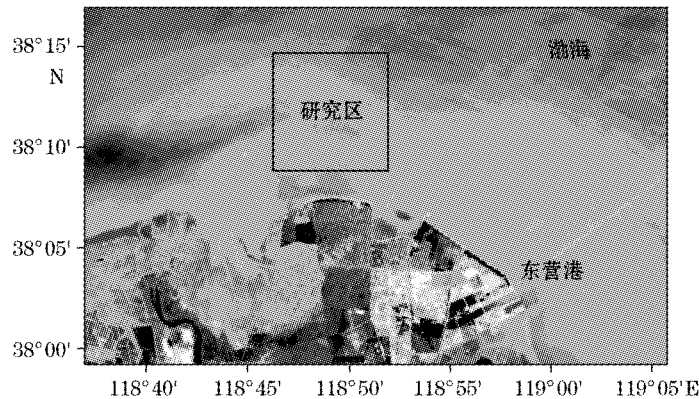


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

研究区内10 m深度以内的土体可分为两层:上层为粉土,厚度为4.0~6.0 m;下层为粉质黏土,层底埋深普遍大于10 m。在波浪作用下研究区部分区域上层粉土发生液化,已液化粉土呈现出的特征与未液化粉土截然不同,下面则对这种液化粉土特征进行研究。

## 2 黄河口液化粉土声学特征

声学浅地层剖面探测是海洋地质调查的重要手段之一,通过探测可以确定研究区海底浅表层沉积物厚度和结构构造特征、识别海底潜在地质灾害现象。它的原理是利用声波反射来探测地层,声波在沉积物内的传播速度受沉积物粒度组成、含水量及密实度等因素影响;声波传播过程中遇到沉积物界面(界面两侧的介质性质存在差异)产生反射,其反射强度及反射率和散射率等受控于沉积物界面上下层物质物理性质的差异性。本次研究使用高分辨率声学剖面探测技术对液化粉土进行调查与解译,分析液化粉土声学剖面特

征及其与周围土层的声学反射差异。

液化粉土的浅地层声学记录特征主要为杂乱反射,内部无明显层理或稍有层理,与周围土层的声学反射特征有明显的差别。研究区浅水段内(水下岸坡上部)液化粉土的海底地貌一般不发育,以平缓海底为主,但是在海底侵蚀残留地貌发育地段,多与侵蚀负地形相伴生,液化层厚度多大于 1 m,最大液化深度可达 5.6 m。

液化粉土之所以呈现出这种无明显层理的浅地层剖面特征主要是由于其液化时土体内部发生了扰动,图 2 所示为一典型扰动土层浅层剖面图像,其中沉积物层内无层理,原始地层结构基本完全破坏,边界较清楚。此类土层多发育在海底地势相对较陡的水下斜坡下缘,如在研究区东部,CB20A 东南 2.8 km 附近发现一处明显的扰动土层,其扰动厚度稳定,多在 4.5 m 左右,最大可达 5.6 m。层内偶见次一级的扰动面。该扰动层发育区东西方向最宽约 650 m,南北向最宽约 150 m。

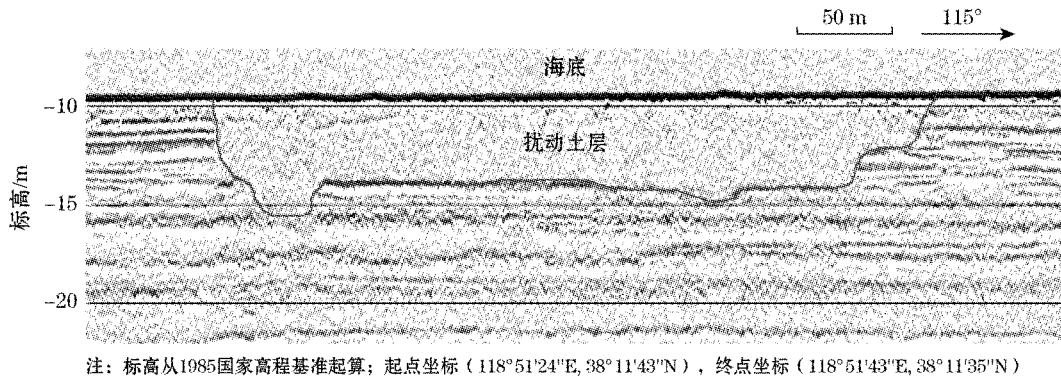


图 2 扰动土层浅层剖面图像

Fig. 2 Sub-bottom profile of the disturbed soil layer

### 3 黄河口液化粉土物理力学参数特征

#### 3.1 搜集钻孔统计

本文搜集了研究区内的 42 个表层为粉土的钻孔资料,对比分析各钻孔所在位置的高分辨率浅地层剖面影像。根据浅地层剖面内部是否无明显层理或层理不清,沉积结构是否杂乱,与周围土层的层理状构造是否有明显差别等特征进行区分,对比发现液化粉土钻孔总计 13 个,未液化粉土钻孔总计 29 个。

所统计的钻孔均进行了现场原位测试和室内土工试验。原位测试主要为标准贯入试验;室内土工试验包括粒度分析试验、含水量试验、容重试验、液塑限试验、三轴压缩试验等测试内容。对钻孔的土工试验数据按照液化粉土与未液化粉土分别进行统计分析。根据岩土工程勘察规范统计出粉土的各物理力学参数的平均值、标准差、变异系数、数据分布范围和数据的数量(表 1 和表 2)。

表1 液化粉土物理力学参数统计表

Table 1 The physical and mechanical parameters of liquefied silt

参数	最小值	最大值	平均值	变异系数	标准差	数据个数
中值粒径/mm	0.029	0.066	0.048	0.010	0.217	22
黏粒质量分数/%	1.90	12.40	8.18	3.11	0.38	22
含水量/%	18.00	29.60	23.00	3.03	0.13	38
容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	19.40	21.20	20.13	0.48	0.02	34
干容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	15.10	17.70	16.40	0.68	0.04	34
孔隙比	0.516	0.786	0.633	0.070	0.110	34
液限/%	19.70	30.00	26.09	2.63	0.10	37
塑限/%	14.40	21.70	18.76	2.01	0.11	37
塑性指数	4.90	9.90	7.33	1.39	0.19	37
液性指数	0.07	0.97	0.59	0.26	0.44	37
黏聚力/kPa	9.00	28.80	16.68	3.86	0.23	28
内摩擦角/ $^{\circ}$	20.60	35.50	26.30	3.57	0.14	28
标贯击数	14	39	25	6.87	0.28	12

表2 未液化粉土物理力学参数统计表

Table 2 The physical and mechanical parameters of unliquefied silt

参数	最小值	最大值	平均值	变异系数	标准差	数据个数
中值粒径/mm	0.025	0.071	0.045	0.011	0.246	33
黏粒质量分数/%	1.60	19.00	9.79	4.66	0.48	34
含水量/%	16.10	46.70	25.82	4.85	0.19	37
容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	17.80	20.60	19.80	0.62	0.03	31
干容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	12.20	16.70	15.71	1.08	0.07	30
孔隙比	0.548	0.976	0.692	0.085	0.121	31
液限/%	14.30	37.50	26.98	4.00	0.15	35
塑限/%	7.60	28.70	19.20	3.44	0.18	36
塑性指数	4.80	9.60	7.83	1.32	0.17	36
液性指数	0.28	1.58	0.76	0.36	0.47	36
黏聚力/kPa	9.00	29.80	16.46	5.85	0.36	15
内摩擦角/ $^{\circ}$	16.90	36.20	24.44	5.97	0.24	15
标贯击数	4	20	12	4.86	0.39	13

### 3.2 液化粉土与未液化粉土物理力学参数对比分析

为了对比扰动区和未液化粉土的各项力学参数的差异,将两类土的含水量、孔隙比、容重、中值粒径、黏粒质量分数、压缩系数和标贯击数七种参数绘制总频率直方图和正态分布频率概率图(图3)。每个参数的总频率直方图和正态分布频率概率图绘制在同一张图上,图形的横坐标为按照所表示参数值的范围划分的区间,每种参数按照大小和分布情况划分为9~11个等值区间。图形左部的主纵坐标为频率直方图刻度,其值代表所有参与计算的样品参数落入某个分类区间的个数,图形右部的次坐标轴为正态分布概率密度刻度,表示落入分类区间的概率密度,实线表示液化粉土参数,虚线表示未液化粉土参数。

如图3所示,研究区海底液化粉土和未液化粉土的含水量、孔隙比、容重、压缩系数和标贯击数等物理力学性质均存在明显的差异,中值粒径和黏粒质量分数也相应的变化。这表明研究区海底液化粉土和未液化粉土的性质有较大的差别。具体表现在:相对于未

液化粉土,液化粉土的含水量和孔隙比降低、容重增加、黏粒质量分数减小、中值粒径变大、分选变好、压缩系数减小、标贯击数值明显增加、土的抗液化强度增加。

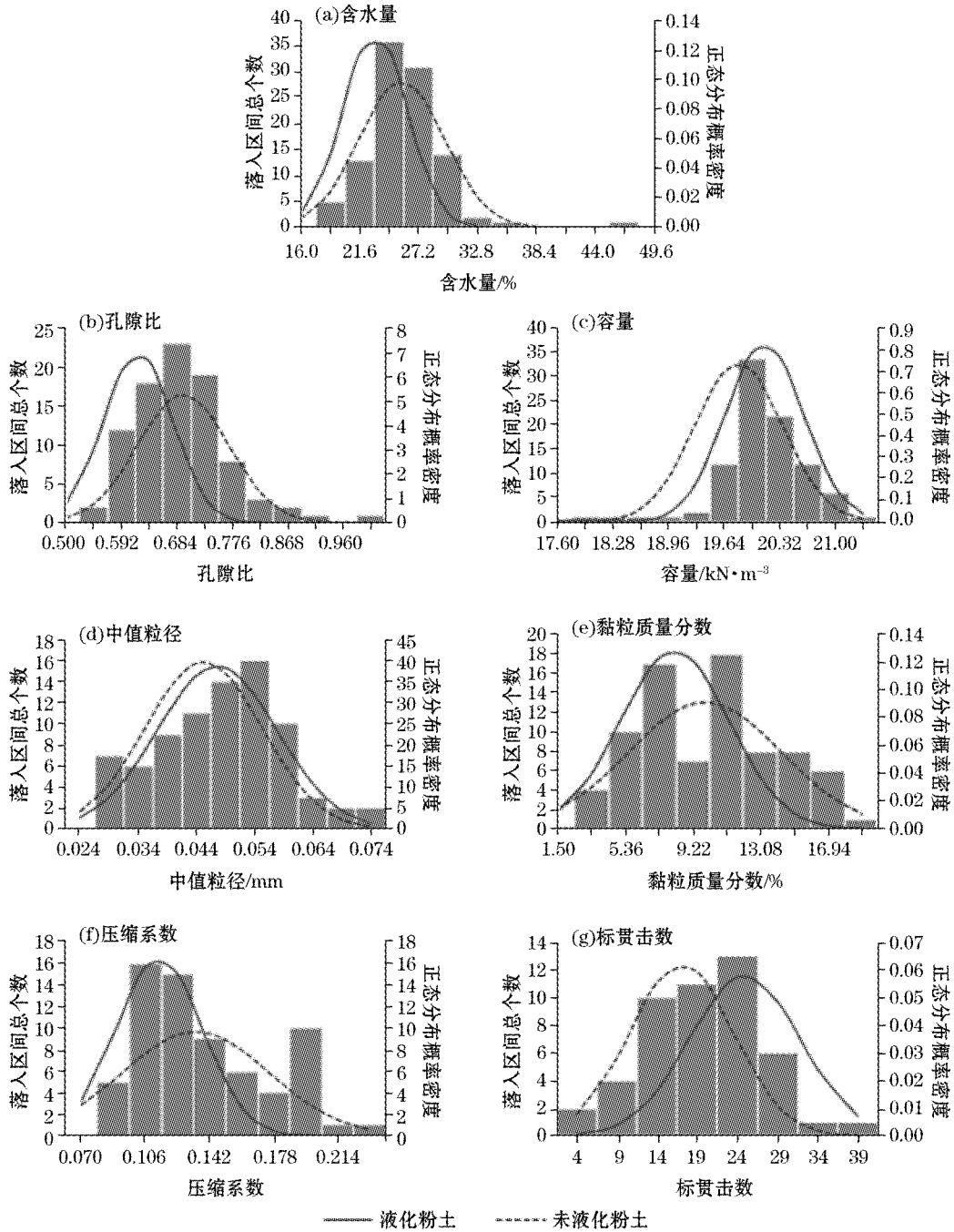


图 3 液化粉土和未液化粉土物理力学参数正态分布概率密度图

Fig. 3 The probability density of normal distribution of the physical and mechanical parameters of liquefied and unliquefied silts

这些数据都充分表明研究区海底粉土在经受过扰动后,其性质发生了变化,暴风浪作用下海底粉土液化是海底粉土性质发生变化的主因<sup>[3]</sup>。粉土在强烈的波浪荷载作用下,土体内部孔隙水压力增大,有效应力减小。当有效应力减弱为零时,土体强度丧失,发生液化。此时部分土颗粒随波浪的振动而进入水中,其中细粒物质的随水流漂移,粗粒物质落淤,海底土孔隙水逐渐排出,土颗粒重新排列,因此失去原始层理结构。液化后的土体由于部分细粒物质的流失而表层粗化,黏粒质量分数降低,中值粒径变大。由于孔隙水的排出,土体含水量减小,容重及密实度增大,土体重新排列后,孔隙比减小、密实度增大,强度有一定程度的提高。

#### 4 黄河口液化粉土微结构特征

土的微结构是土体物理力学性质的微观基础,是沉积环境、土颗粒性质、表面力以及沉积后各种外力等多种因素综合作用的产物<sup>[7]</sup>。微结构的研究是探索土的工程性质形成与变化机理的有效途径。在过去的几十年,人们采用光学显微镜、X光射线、透射电镜和扫描电镜等手段对土体的微结构特征进行研究,其中扫描电子显微镜(SEM)是目前研究土体微结构形态的最主要手段<sup>[8-9]</sup>。

研究区内表层沉积物几乎全为粉土。黄河三角洲特殊的沉积环境、沉积物源及水动力条件等因素,导致此区域海底土具有差异性。这种差异则表现在海底扰动区粉土和未扰动区粉土的性质差异,未扰动粉土在液化后的微观结构有着较大的变化。

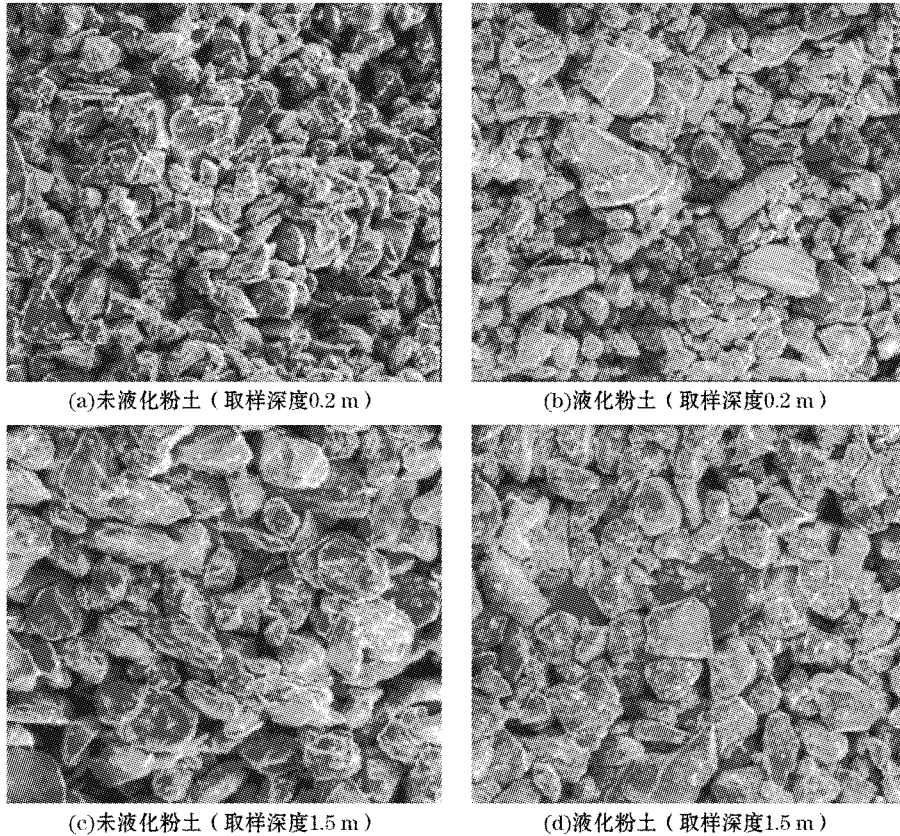
为探讨研究区海底沉积物土质特征的空间差异性,揭示波浪作用对海底表层沉积物的改造作用,本文运用扫描电镜对液化粉土与未液化粉土微结构进行观测,从微观结构方面探询不同扰动程度的海底沉积物土质特征差异,研究不同外动力条件对土质微结构的影响,为分析海底液化粉土层的成因提供佐证。

仪器使用荷兰FEI公司生产的Quanta 200型电子显微镜,操作条件为低真空模式(Low Vacuum),显微镜探头为低真空探头(LFD),工作电压为20 keV(accelerating voltage of 20-keV),工作距离(Wd)为10 mm。将扫描样品从土样中心部位进行断面切取,保持观测土样断面的天然结构,选取合适的放大倍数进行拍照。

通过对扫描电镜照片进行对比分析可见,不同取样位置、取样深度的土体微观结构具有一定的差异,主要包括物质颗粒的大小粒径、均匀性、分选与级配、细粒物质的含量与存在形式、颗粒的形状及排列的定向性等方面。如图4中扰动钻孔,钻孔上部0.2 m处粗粒物质较多,分选差,级配较好,颗粒间距紧密,孔隙较小,而对应深度的未液化粉土正呈现出相反的特征,样品粗粒物质极少,基本均为细粒物质,分选好,级配差,部分颗粒间含孔隙较大,整体结构较为疏松。

对比2个钻孔1.5 m深度土样的微结构同样可以发现以上规律,位于扰动区的土体,表层沉积物内细颗粒物较少,土骨架颗粒的定向性较好。在相同深度1.5 m处,强扰动区的土体细粒物质含量少,存在方式为填充于颗粒间;而未扰动区土体的细粒物质含量较多,存在方式以附着于土颗粒表面为主。随着取样深度的增加,不同程度扰动区的土体包含细颗粒均增多,但弱扰动区处土体细颗粒相对较多。相比较而言,强扰动区颗粒结构更为密实。扫描电镜图片汇总见图4。

研究区不同区段海底土微结构的差异,可以认为是由于不同位置波浪对土体作用的强度不同,或者是由于海底沉积物性质差异导致的对波浪的动力响应程度不同,二者联合作用导致土体微结构在空间上存在差异。



注:图a和图b放大倍数为 $\times 500$ ,图c和图d放大倍数为 $\times 800$

图 4 扫描电镜图

Fig. 4 SEM photos of liquefied and unliquefied silts

## 5 黄河口液化粉土动三轴试验分析

动三轴试验的目的是确定粉土的抗液化剪应力比曲线,它是引起土层液化破坏的振动剪应力比随破坏振次的变化关系曲线。

### 5.1 试验原理与方法

在动三轴试验中,用试验土样 $45^\circ$ 面上的振动剪应力与固结压力 $\sigma_c$ 之比表示振动剪应力比,即 $\sigma_d/2\sigma_c$ ,其中, $\sigma_d$ 是试验土样轴向受到的振动应力, $\sigma_c$ 是试验土样受到的固结压力。破坏振次 $N_f$ 的确定则与一定的破坏标准相对应。本次试验中,以累积超孔隙水压力达到围压 $\sigma_c$ 做为液化破坏标准,进而确定破坏振次 $N_f$ 及相应的抗液化剪应力比曲线。振动三轴试验土样尺寸为直径 $D=3.80$  mm,高 $H=76$  mm。试验过程:首先利用真空饱和法使土样重新饱和;将试验土样安置在振动三轴仪的压力室内;根据土试样所代表

的土层受到的上覆有效压力,给土样施加固结压力使土样固结,以1 h内排水量小于 $0.1 \text{ m}^3$ 做为固结标准;土样固结完成后,在不排水条件下,沿其轴向施加0.2 Hz的正弦振动应力,直到土样液化为止。

## 5.2 试验结果分析

因研究区海底存在液化粉土与未液化粉土,为分别研究液化粉土与未液化粉土的液化强度,收集研究区及其附近海域前期所做的动三轴液化试验数据进行分析。

本次收集液化粉土钻孔与未液化粉土钻孔的原状样各1个。采用相关性分析分别研究液化粉土与未液化粉土的剪应力比与破坏振次之间的关系,如图5所示。

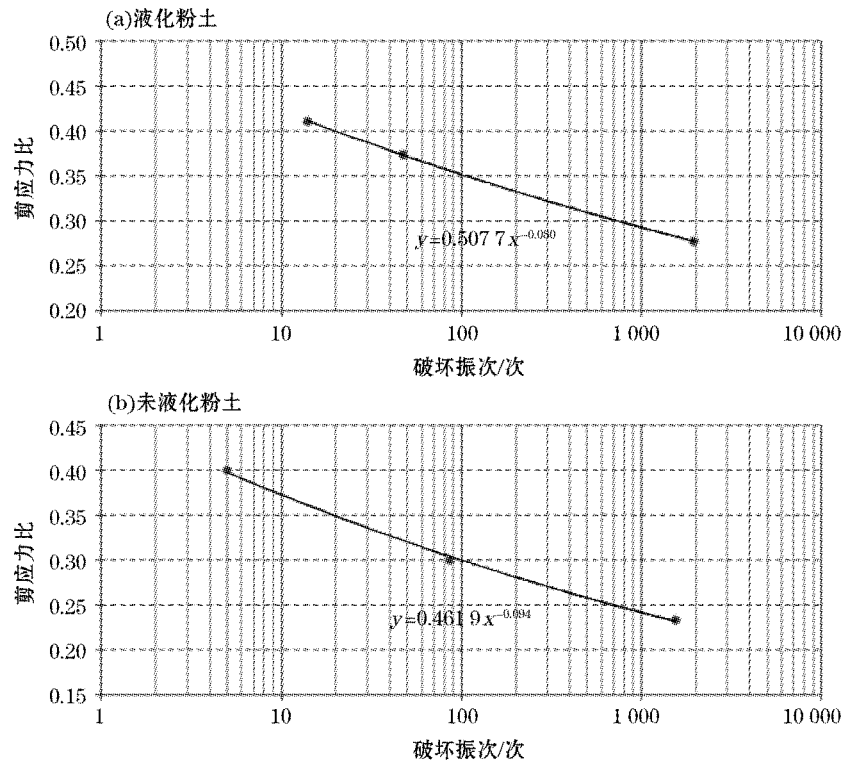


图5 液化粉土与未液化粉土的抗液化剪应力比曲线

Fig. 5 The anti-liquefaction shear stress ratio of liquefied and unliquefied silts

以振动100次为基准,通过回归方程计算液化粉土与未液化粉土的剪应力比分别为0.35与0.30;以振动1000次为基准,通过回归方程计算液化粉土与未液化粉土的剪应力比分别为0.29与0.24。由此可见,在相同的振次条件下,液化粉土的抗液化剪应力比均比未液化粉土大,这是由液化粉土与未液化粉土的土性差异所致。相对于未液化粉土,已液化粉土在液化过程中由于孔隙水排出,黏粒质量分数丧失,导致其含水量和孔隙比降低,密实度增大,容重也随之增大,标贯击数明显增加,总体强度有所提高,液化粉土发生重复液化的抗液化强度也相应增强。对于液化粉土,再次发生液化则需要更强的波浪作用。在相同风浪条件下,同一埋深处液化粉土的抗液化强度比未液化粉土大,因此,液化粉土较未液化粉土更难发生液化。



## 6 结 语

黄河口海底分布着大量的液化粉土,它的性质与未液化粉土有着显著的差别:1)液化粉土典型的声学特征是内部无明显层理或层理不清,沉积结构杂乱,与周围层理清晰的未液化粉土形成鲜明的对比;2)液化粉土的物理力学性质相对于未液化粉土有着明显的变化,液化粉土的含水量和孔隙比降低、容重增加、黏粒质量分数减小、中值粒径变大、分选变好、标贯击数值增加、土的抗液化强度增加;3)在微结构特征上,液化粉土粗粒物质较多,分选差,级配较好,颗粒间距紧密,孔隙较小;4)通过动三轴试验分析,在相同的振次条件下,液化粉土的抗液化剪应力比均比未液化粉土大,液化粉土较未液化粉土更难发生液化。

### 参考文献:

- [1] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 孙永福,董立峰,宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土液化粉土层特征及成因探析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499.
- [3] 杨少丽,沈渭铨,杨作升. 波浪作用下海底粉砂液化的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 28-37.
- [4] 冯秀丽,戚洪帅,王腾,等. 黄河三角洲埕岛海域地貌演化及其地质灾害分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 17-20.
- [5] PRIOR D B, YANG Z-S, BORNHOLD B D, et al. Active slope failure sediment collapse and silt flows on the modern subaqueous Huanghe(Yellow River) delta[J]. Geo-Marine Letters, 1986, 6(2): 85-95.
- [6] PRIOR D B, YANG Z-S, BORNHOLD B D, et al. The subaqueous delta of the modern Huanghe (Yellow River)[J]. Geo-Marine Letters, 1986, 6(2): 67-75.
- [7] RAHMAN M S, JABER W Y. A simplified drained analysis for wave-induced liquefaction in ocean floor sands[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(3): 57-68.
- [8] SASSA S, SEKIGUCHI H. Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds[J]. Geotechnique, 2001, 51(2): 115-126.
- [9] YAMAMOTO T, KONING H L, SELLMER H, et al. On the response of a poro-elastic bed to water waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 87(1): 193-206.

---

---

## Study on the Characters of Seabed Liquefied Silts in the Yellow River Estuary

MA Bin-bin, SUN Yong-fu, HU Guang-hai, SONG Yu-peng, DONG Li-feng,  
LIU Xiao-yu, CAO Cheng-lin

(*The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*)

**Abstract:** The sea area of the Chengdao Oil Field in the Yellow River Estuary is selected as the study area. On the basis of previous studies, the differences in the properties of liquefied and unliquefied silts are analyzed in terms of acoustic characteristics, physical and mechanical parameters, micro-structural characteristics and dynamic triaxial tests. The results show that the physical and mechanical properties of the liquefied silt differ distinctly from those of the unliquefied silt; Comparing with the unliquefied silt, the liquefied silt shows an increase in its SPT blow count and has a bigger anti-liquefaction shear stress ratio and higher liquefaction resistance under the same shake frequency. In addition, the reliquefaction of the liquefied silt is more difficult than that of the unliquefied silt.

**Key words:** Yellow River Estuary; liquefied silt; anti-liquefaction resistance