

黄河水下三角洲扰动粉土微观结构特征分析

焦鹏飞^{1,2}, 孙永福^{1,2}, 刘晓瑜^{1,2}, 宋玉鹏^{1,2}, 董立峰^{1,2},
曹成林^{1,2}, 张伟朋^{1,2,3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266235;
3. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:黄河水下三角洲分布着大量的扰动粉土层,其微观结构与未扰动粉土相比有显著差异。基于浅地层剖面探测、钻探取样等技术,利用电子扫描显微镜、图像处理等方法来研究扰动粉土的微观结构特征。结果表明,扰动粉土与未扰动粉土两者在结构类型、颗粒之间的接触方式、粒度组成、定量参数等方面均存在显著差异。扰动粉土与非扰动粉土的结构类型都属于骨架状结构,不同的是扰动粉土以直接接触为主,粒间无细粒及黏粒成分相隔。扰动粉土粒度组成偏向粗化,孔隙比降低、含水率升高、饱和度升高、比重增大、颗粒圆形度降低、颗粒分形维数降低。同时探讨了扰动粉土微观结构差异原因及其与工程地质性质之间的关系,认为在波浪作用下粉土中孔隙水的渗流带走细粒物质,颗粒发生重新排列从而导致微观结构变化,进而使其强度得以提高。

关键词:扰动粉土;微观结构;定量分析;波浪作用;渗流作用;颗粒重排

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)02-0253-09

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.02.010

粉土是黄河水下三角洲表层沉积物中发育的主要土质类型,这类土在波浪或者地震作用下极易发生液化,从而引发海底粉砂流、地基失稳等地质灾害。粉土对于波浪作用的响应具有特殊性,尤其是在微观结构上会发生显著的变化。土的微观结构,通常是指组成土的基本单元(单粒)或者结构单元(集粒)的大小、形状、各结构单元体和孔隙在空间的排列情况^[1]。土的工程地质性质与微观结构之间的关系密切,其直接受颗粒特征、颗粒和孔隙的排列及粒间相互作用力所控制。对于岩土微观结构的研究技术方法经历了光学显微镜、X射线、电子显微镜及CT扫描技术等的发展。目前使用扫描电子显微镜(SEM)逐渐成为了研究土的微观结构与岩土工程地质性质关系的重要手段和方法^[2]。

对于波浪作用下海底粉土的响应,前人已取得了一定的研究成果^[3-11]。杨少丽等^[3]从土质学的观点探讨了波浪作用下海底粉土液化的原因,定量分析了海底土体对于动荷载的响应,并从微观角度初步探讨了其不稳定性的机制。冯秀丽等^[4]利用室内动三轴试验结果,分析了动荷载作用下粉土的动应力应变关系,确定了波浪作用下粉土的应力状态、破坏临界循环次数,并判断出了不同深度处的粉土发生液化的可能性及发生液化所需要的时间。孙永福等^[5]利用工程地质钻探取样、原位静力触探试验和浅地层剖面探测,对海底扰动土层的厚度及工程地质特征进行了调查分析,并探讨了扰动土层的成因机制。许国辉等^[6]利用埕岛海域的浅地层剖面探测资料,对扰动地层的结构特征进行了描述,分析了扰动地层的工程地质条件变化特点,并结合已有的水槽试验研究资料,利用动力循环荷载下土体强度弱化,波致土层滑动的波-土相互作用的动力学

收稿日期:2017-02-22

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);青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目——海底地质灾害监测预警与评估关键技术预研究(2015AS KJ03);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——北黄海底麻坑群精细地貌特征研究及成因分析(2015G15);国家自然科学基金项目——基于形态学特征和声学探测技术的北黄海底麻坑群成因研究(41506069);山东省自然科学基金项目——细粒土侵蚀强度与冲刷深度量化研究(ZR2014DP002)

作者简介:焦鹏飞(1990-),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail:jiaopf_2016@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

观点,探讨了黄河水下三角洲浅表局部扰动地层的形成及工程地质特性。而对于水动力作用下海底土微观结构特征的变化,有少数学者也做了初步的研究并得到了相应的认识。王俊超等^[7]选取了超水动力作用下的黄河三角洲原状土进行了粒度成分测试和微观结构观测分析,利用不同深度处分形维数等参数的差异性说明了海底土层化现象。单红仙等^[8]对黄河三角洲潮坪上的沉积物进行微结构扫描电镜观测分析,研究水动力作用对沉积物微结构的改造,并用一些定量参数来表征改造结果,并初步推测其变化机理可能与波浪作用下粉土的非均匀液化和触变有关。

本研究以黄河水下三角洲原状扰动粉土和未扰动粉土为研究对象,以扫描电子显微镜技术和图像处理技术作为研究手段,从微观结构角度研究波浪扰动作用对于海底粉土的影响,以期研究成果为研究海底土体扰动变形的工程地质性质本质机理提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲北部刁口流路的废弃河口外的水下三角洲,其位置如图 1 所示。黄河水下三角洲分布于低潮线以下至水深 18 m 处,有的地方较浅,约在水深 13 m 处,它呈带状环绕陆上三角洲平原,一般宽度为 15 km^[12]。在现行河口区水下三角洲的水动力状况为径流起主要作用,海洋动力作用对径流有一定的影响;而在废弃河口区径流基本消失,海洋动力尤其是波浪动力起主要作用。本研究中通过钻探取得的海底原状土,其水深在 5~10 m 内,经室内土工试验的粒度成分测试分析后,按照《岩土工程勘察规范》^[13]中的分类标准将其定名为粉土。

1.2 样品来源

本研究的目标样品是扰动粉土和未扰动粉土。扰动粉土层是黄河口区域内广泛发育的一种海底浅层地质现象。孙永福等^①曾对黄河三角洲埕岛海域海底进行了灾害地质研究,并对埕岛海域海底遭受扰动的地层进行了详细的调查工作。扰动土层可以通过浅地层剖面探测资料来识别,其浅地层声学记录特征主要为杂乱反射,内部无明显层理或层理不清,地层沉积结构杂乱,与周围土层的层理状声学反射特征有明显差别,如图 2 所示。图 2 的浅地层剖面位于图 1 中黑线位置处。据此,我们通过浅地层剖面的导航定位信息确定钻探位置,然后利用钻探方法获得了 2 个钻孔的柱状样品,如图 1 中 K1 和 K2 所示,其中 K1 位于未扰动区, K2 位于扰动区。样品分取是在室内完成,根据浅层剖面中识别出的钻孔处扰动粉土层的厚度,分别选取了 2 个柱状样表层 3 m 内的多个扰动粉土原状样品和未扰动粉土原状样品进行研究。

1.3 试验设备

本次研究使用 Quanta 200 型环境扫描电镜进行扫描,获取了 2 种土的大量的 SEM 照片。实验过程中,为了保证粉土的原始真实状态,采用冷冻真空干燥法进行粉土样品制备。此外,对制备好的样品进行扫描断面的制作,与其他材料采用的切割法不同,粉土样品采用自由断裂的方法制成,目的是保证土颗粒与孔隙的原

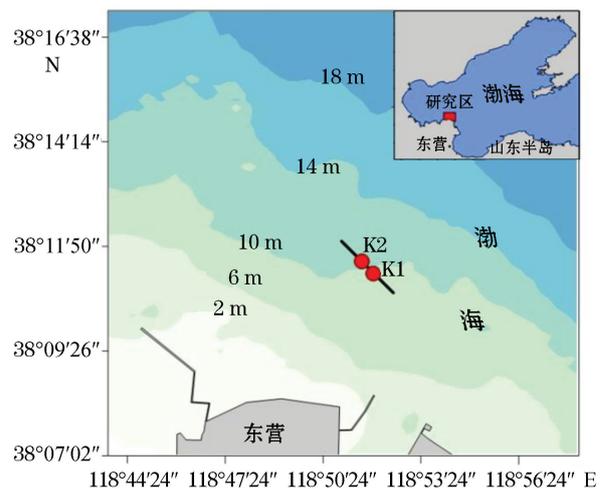


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

① 孙永福,等.埕岛油田灾害地质研究成果报告,2006:46-73.

始真实形态,减小对颗粒及孔隙结构参数的影响。这样得到的实验结果能最大程度的代表了粉土的真实状态。

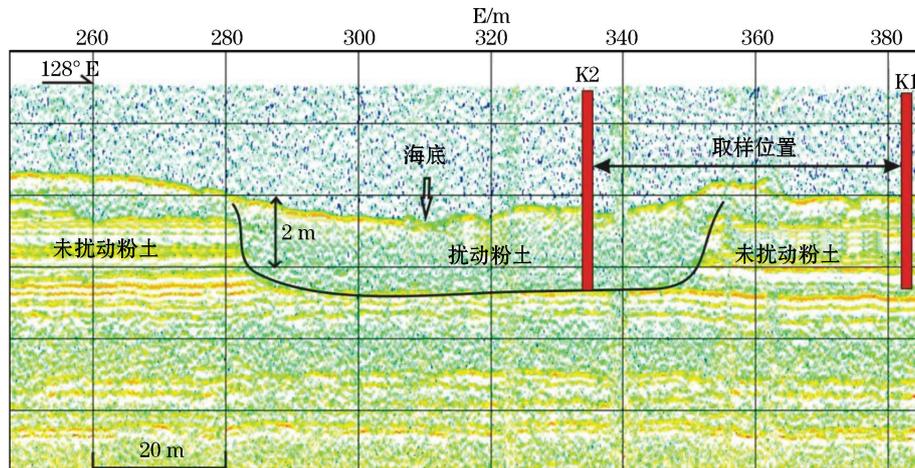


图2 样品来源位置

Fig.2 Location of the samples

1.4 定性定量分析方法

1.4.1 定性分析

根据获取的扰动粉土和非扰动粉土的 SEM 照片,可以定性分析其结构类型、颗粒接触类型以及孔隙特征。依据成因、物质组成、联结和骨架特征等方面的不同,将土的结构类型分为:骨架状结构、絮凝状结构、团聚状结构、团粒状结构、叠片状结构、凝块状结构、蜂窝状结构、海绵状结构、磁畴状结构以及基质状结构等^[1]。骨架状结构是指主要以粉粒为骨架,构成松散而均匀的较大孔隙的结构类型,黏粒不均匀地分布在其中,有时黏粒呈薄膜状或者局部覆盖在单粒表面,有时则位于粉粒的接触点上起着联结作用。这种结构类型联结力较弱,在外界环境变化时,原始结构极易发生改变。颗粒之间的接触类型可以分为直接接触和间接接触,其中直接接触又可分为直接点接触、直接面接触。粉土中存在多种孔隙,这些孔隙与骨架颗粒的排列方式有关,可分为大孔隙、架空孔隙、粒间空隙及粒内孔隙等^[14]。

1.4.2 定量分析

使用扫描电镜获得的 SEM 照片中包含了颗粒和孔隙各种参数信息,包括颗粒及孔隙的直径、平均直径、长轴直径、短轴直径、周长、面积等。定量分析时用图像处理软件 Image Pro Plus 对 SEM 照片进行分析处理,并提取需要的特征数据。为了更好地定量表示粉土的微观特征,我们选取了 3 种表征参量:面孔隙比 e 、圆形度 R_0 、分形维数 D ^[15-16]。

面孔隙比 e 是指获取的扫描断面上孔隙与颗粒的面积比值,可以表征粉土的密实程度:

$$e = S_e / S_s, \quad (1)$$

式中: S_e 代表孔隙总面积, S_s 代表颗粒总面积。

圆形度 R_0 用来描述目标形状接近圆形的程度, R_0 值越大,则目标越接近圆形,间接说明了粉土颗粒越接近球体:

$$R_0 = 4\pi A / P^2, \quad (2)$$

式中: A 代表颗粒的面积, P 代表颗粒的周长。

分形维数 D 表征表面结构的粗糙复杂程度, D 值越大,则表面越粗糙复杂:

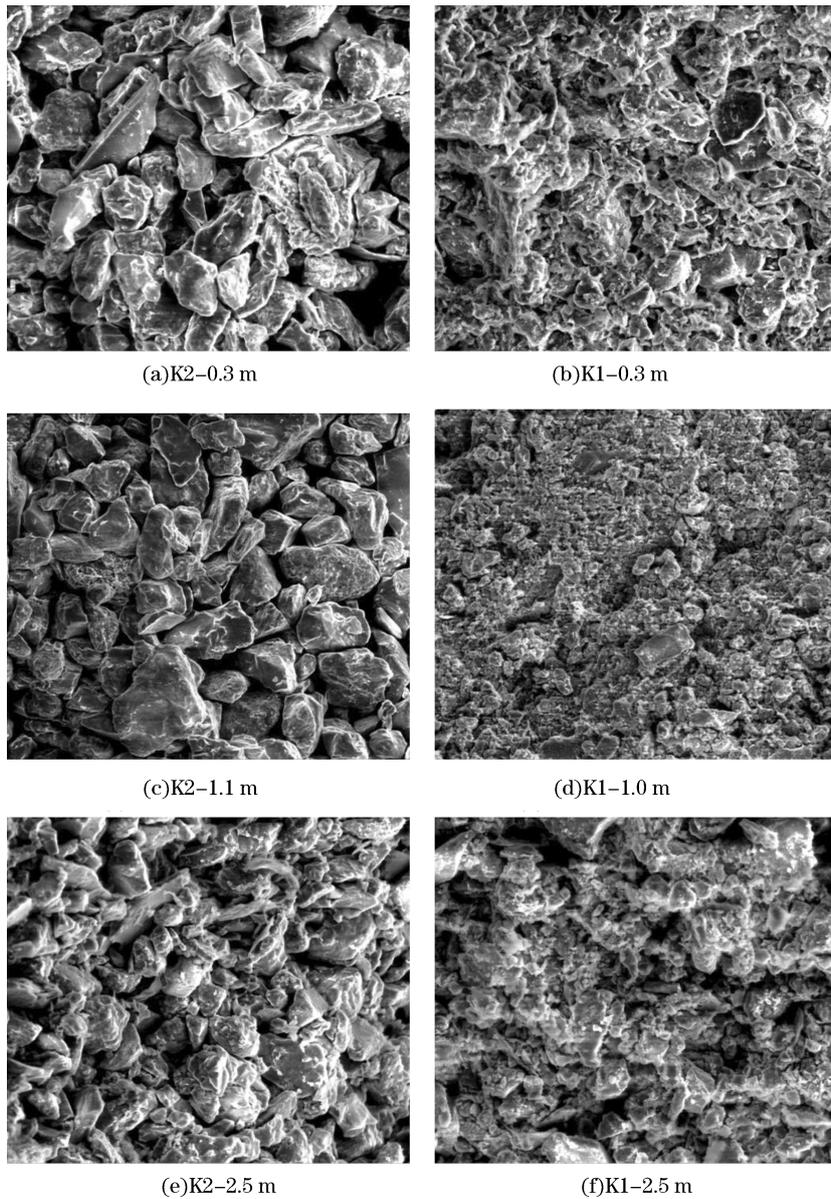
$$\lg P = D/2 \times \lg A + C, \quad (3)$$

式中: P 代表颗粒周长, A 代表颗粒面积, C 为常数。

2 试验结果分析

2.1 定性分析

我们分析粉土的代表性 SEM 照片(图 3)后,可以将其结构类型划分为骨架状结构。扰动粉土的骨架状结构更为明显,颗粒骨架清晰,粉粒表面的细粒以及黏粒物质较少;颗粒之间的接触方式多以直接点接触或者面接触为主;孔隙多为粒间孔隙,偶有大孔隙的存在。未扰动粉土的粉粒表面多被细粒和黏粒附着,骨架颗粒较为清晰;颗粒之间尤其是粉粒之间接触方式多以间接接触为主,颗粒之间多有黏粒相隔;孔隙多为粒间空隙,鲜有大孔隙存在。



注:K1 为扰动土,K2 为未扰动土

图 3 典型扰动粉土与未扰动粉土 SEM 照片

Fig.3 Typical disturbed and undisturbed silt SEM photos

2.2 定量分析

2.2.1 粒度组成分析

由 SEM 照片直观感知,扰动粉土的粒度要稍比未扰动粉土粗一些,细颗粒较少。为了证明这一观点,我们在室内土工试验室利用激光粒度分析法分析了 2 种状态的土的粒度组成,每种状态的土测定了 3 个不同的土样,并将得到的数据列于表 1 中。由表 1 可知,扰动粉土中粉粒的平均质量分数为 93.2%,比未扰动粉土粉粒平均质量分数(88%)高出 5.2%,而黏粒平均质量分数为 5.37%,比未扰动粉土黏粒平均质量分数 10.33%约低 5%。结果表明扰动粉土比未扰动粉土粒径组成更趋向粗化。

表 1 扰动粉土与未扰动粉土粒度组成

Table 1 Grain composition of disturbed and undisturbed silt

粉土类型	序 号	粒组质量分数/%		
		$0.25 > d \geq 0.075$	$0.075 > d \geq 0.005$	$d < 0.005$ mm
未扰动粉土	1	2.3	89.4	8.3
	2	1.0	90.8	8.2
	3	1.7	83.8	14.5
	平均	1.7	88.0	10.33
扰动粉土	1	1.3	96.8	1.9
	2	1.7	93.4	4.9
	3	1.3	89.4	9.3
	平均	1.4	93.2	5.37

2.2.2 定量参数分析

为了确保试验结果更具有说服力,我们选取了多张 SEM 图像进行处理,提取参数后分析计算并取其平均数,将得到的结果列于表 2 中。结果表明,扰动粉土的面孔隙比为 0.642 2,比未扰动粉土面孔隙比(0.798 9)低 0.156 7;圆形度 R_0 值为 R_0 (0.607 8),比未扰动粉土的 0.629 9 低 0.022 1;分形维数 D 值为 1.52,比未扰动粉土的 D 值(1.61)低 0.09。由表 2 可知,扰动粉土与未扰动粉土相比:面孔隙比减小,说明粉土经扰动之后变得更加密实;圆形度有所减小,说明粉土经扰动之后颗粒偏离球体而变得扁平而细长;分形维数有所减小,说明粉土经扰动之后颗粒表面的粗糙复杂程度降低。

同时,测定了土样的物理性质指标,包括含水率、密度、比重、孔隙比、饱和度等,如表 3 所示。由表 3 可知,扰动粉土的平均含水率为 25.3%,比未扰动粉土的平均含水率(28.2%)要低;扰动粉土的平均孔隙比为 0.71,比未扰动粉土的平均孔隙比(0.86)要低;扰动粉土的平均饱和度为 96%,比未扰动粉土的饱和度 88.3%要高。以上结果说明,波浪的扰动作用可以使得粉土中的孔隙被压缩,孔隙水被排出,从而使得其含水率降低、孔隙比降低而饱和度增高。

表 2 扰动粉土与未扰动粉土微观结构定量参数

Table 2 The microstructure quantitative parameters of disturbed and undisturbed silt

粉土类型	e	R_0	D
扰动粉土	0.642 2	0.607 8	1.52
未扰动粉土	0.798 9	0.629 9	1.61

表 3 扰动粉土与未扰动粉土粒度的物理性质
Table 3 The properties of disturbed and undisturbed silt

粉土类型	序号	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	比重	孔隙比	饱和度/%
未扰动粉土	1	27.8	1.89	2.68	0.812	92.0
	2	28.8	1.87	2.69	0.853	91.0
	3	28.0	1.79	2.69	0.924	82.0
	平均	28.2	1.85	2.69	0.860	88.3
扰动粉土	1	25.4	1.97	2.68	0.706	96.0
	2	23.2	2.04	2.68	0.619	100.0
	3	27.3	1.90	2.69	0.802	92.0
	平均	25.3	1.97	2.68	0.709	96.0

3 讨论

3.1 扰动粉土层微观特征差异原因分析

外在动力在粉土层上的加载可以引起粉土层的扰动。这些外在动力包括地震、波浪、人类工程活动等。其中地震虽然可以产生很大的能量,但是地震波对于海底土的加载点是位于土层的下部,而波浪的加载点则是位于土层的上部。人类活动诸如抛锚、插拔桩、钻探施工等均可以引起土层的扰动,但只能对局部土层起作用,影响范围不会太大。而在研究区内存在大量的扰动土层,且分布范围较广,所以在考虑扰动土层的成因时,基本可以忽略人类活动的影响。地震波从深处传来时首先会使得海底以下较深处土层产生扰动再传到浅表层,调查结果显示,黄河口扰动土层主要存在于沉积物的浅表层,其成因主要是在波浪作用下形成的。关于波浪对于扰动土层的形成的作用机制,孙永福等^[5]认为黄河口粉质土的扰动由极端风浪条件下土体的液化引起的;许国辉等^[6]则认为是由强波浪对海底的循环荷载作用及波峰-波谷之间的剪切作用导致局部土体的剪切破坏。认为波浪扰动作用下的孔隙水渗流使得附着于大颗粒表面细粒物质脱离并被带走,颗粒随之发生重新排列从而引起微结构的变化。Geoddard 也认为波浪作用下土体结构破坏,颗粒会发生重排^[17]。

粉土微观特征的定量分析结果表明,与未扰动粉土相比,扰动粉土的面孔隙比 e 减小,说明了扰动之后的粉土更加密实,原因在于粉土在波浪扰动之后,颗粒发生重排,孔隙空间缩小,比原来排列的更加紧密;圆形度 R 也有所减小,说明粉土经波浪扰动之后颗粒变得扁平而细长,原因在于附着于粉粒表面的黏粒物质在波浪的扰动作用下脱离粉粒骨架,使得粉粒圆形度降低;分形维数 D 有所减小,说明粉土扰动之后粉土颗粒的粗糙复杂程度降低,原因在于波浪扰动过程中细粒和黏粒物质被带走,减弱了颗粒表面的复杂程度。

波浪扰动作用的机理:首先波浪作用下会形成渗流场,在波谷处产生超孔隙水压力,并随着波浪的持续作用会差生超孔压的累计,在达到某一程度时便会形成向上的渗流场(图 4a),这会使得粉土中的一些细粒物质随着孔隙水的渗流溢出海床,进而被海底浪流运移至他处;当波浪在以一定周期连续扫过海底时,不同位置处的粉土层依次发生孔隙水渗流,并带走细粒物质(图 4b),因为近岸波浪属于不规则波且随天气变化而变化,所以发生渗流的位置是随机的,并不会随等深线呈条带状分布;当细粒物质被带走到一定程度时,会发生颗粒的重排,孔隙空间缩小,土体变得更加密实(图 4c)。需要说明的是,孔隙水的渗流并不能在所有海底区域内都会形成,而是在部分区域内形成。其原因是,孔隙水的渗流在于波浪作用下孔隙水压力的积累和消散,只有当孔隙水压力积累到一定程度时才会发生渗流,形成扰动区。当一定区域内发生渗流时也就意味着孔隙水压力得以消散,而且能够使发生渗流区域附近一定范围区域内的孔隙水压力都得以消散,从而不发生扰动。这就是受同样的波浪作用,有的地方发生扰动,有的地方不发生扰动的原因。

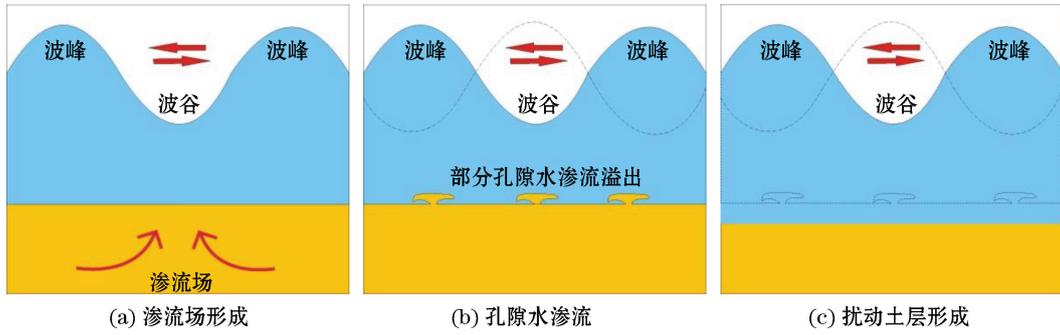


图 4 波浪作用下孔隙水渗流示意图

Fig.4 The diagram of pore-water seepage due to the wave

3.2 扰动粉土微观结构与其工程地质性质关系分析

粉土经波浪扰动以后微观结构发生了变化,其工程地质性质也会相应的发生变化。由表 3 可知,与未扰动粉土相比扰动粉土的密度增大,含水率减小,孔隙度降低。孙永福等^[5]在本研究区内,通过原位静力触探试验得到了图 5 所示的结果,由图可知扰动粉土的锥尖阻力值明显高于未扰动粉土,以此证实了扰动粉土强度比未扰动粉土有明显提高。

从微观角度来分析以上变化,探讨造成以上扰动粉土工程地质性质变化的本质机理。扰动粉土的密度增大、含水率减小、孔隙度降低、强度的提高,都可以归因于波浪作用下孔隙压缩,孔隙水发生渗流,并带走了颗粒表面的细粒物质,使得颗粒之间发生重新排列。颗粒重排的过程,使得每一个颗粒都有时间去寻找适合自己的最佳位置,从而使得土体中孔隙空间减小,密度增大;孔隙水部分渗流排出,使得含水率减小。扰动粉土颗粒的分形维数减小,其中大骨架颗粒之间细粒物质减少,使得颗粒之间更不容易发生滑动,从而致使其强度提高。而对于微观结构参数与粉土体强度参数之间的定量关系表达,目前的研究尚未得出。

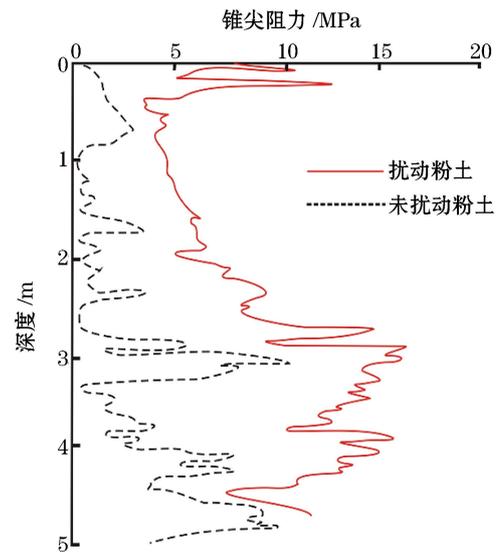


图 5 扰动土体与未扰动土体强度对比^[5]

Fig.5 Comparison between disturbed soil and undisturbed soil^[5]

4 结 论

利用浅地层剖面探测、钻探取样等技术,使用电子扫描显微镜、图像处理等方法研究了扰动粉土独特的微观结构特征,并分析讨论了扰动粉土形成原因,从微观角度解释了扰动粉土与未扰动粉土的工程地质性质差异的原因,最后得出结论:

1) 扰动粉土的结构类型为骨架状结构,颗粒骨架清晰且明显,粉粒表面的细粒以及黏粒物质较少;颗粒之间的接触方式多以直接点或者面接触为主;孔隙多为粒间孔隙,偶有大孔隙的存在。

2) 扰动粉土与未扰动粉土相比:面孔隙比减小,从而说明经扰动之后的粉土更加密实;圆形度也有所减小,说明粉土扰动之后颗粒偏离球体而变得扁平而细长;分形维数有所减小,说明粉土经扰动之后颗粒表面的粗糙复杂程度降低。

3) 黄河口扰动粉土层的形成主要是在波浪作用下形成的,波浪扰动作用可以使得粉土微结构发生变化,粒度组成趋向粗化。

4) 扰动粉土工程地质性质的变化,主要因为波浪作用下孔隙水发生渗流,同时带走了颗粒表面的细粒物质,并使得颗粒之间发生重新排列,从而使得土体中孔隙空间减小,密度增大;孔隙水部分渗流排出,使得含水率减小;粉土颗粒的分形维数减小,颗粒表面变得细粒物质减少,使得颗粒之间更不容易发生滑动,从而致使其强度提高。

参考文献(References):

- [1] ZHAO C G, BAI B, et al. Fundamentals of soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 赵成刚, 白冰, 等. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] TANG C S, SHI B, WANG B J. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565. 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565.
- [3] YANG S L, SHEN W Q, YANG Z S. The mechanism analysis of seafloor silt liquafiction under wave load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(4): 28-37. 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] FENG X L, YE Y C, MA Y X, et al. Silt pore pressure response and dynamic strength under dynamic loading[J]. Journal of Ocean University of Qingdao(Natural Science), 2002, 32(3): 429-433. 冯秀丽, 叶银灿, 马艳霞, 等. 动荷载作用下海底粉土的孔压响应及其动强度[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 429-433.
- [5] SUN Y F, DONG L F, SONG Y P. Analysis of characteristics and formation of disturbed soil on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1494-1499. 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499.
- [6] XU G H, WEI C C, SUN Y F, et al. The engineering characteristics of shallow disturbed strata and analysis of their formation on the subaqueous Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(6): 19-25. 许国辉, 卫聪聪, 孙永福, 等. 黄河水下三角洲浅表局部扰动地层工程特性与成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 19-25.
- [7] WANG J C, JIA Y G, SHI W J, et al. Case study on the fractal characteristic variations of silty soil microstructure due to differential hydrodynamics in the Yellow River Estuarine area[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(2): 177-183. 王俊超, 贾永刚, 史文君, 等. 差异水动力导致黄河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(2): 177-183.
- [8] SHAN H X, LIU Y Y, JIA Y G, et al. Case study of microstructure transform of silt due to wave action on subaqueous slope of Yellow River, China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 654-658. 单红仙, 刘媛媛, 贾永刚, 等. 水动力作用对黄河水下三角洲粉质土微结构改造研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 654-658.
- [9] ZHANG A B, LIU M, LIAO Y J, et al. The sedimentary geochemical trace of the Yellow River sediments diffusion in the Bohai Bay[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(2): 246-256. 张爱滨, 刘明, 廖永杰, 等. 黄河沉积物向渤海湾扩散的沉积地球化学示踪[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(2): 246-256.
- [10] CAO J R, XU X U, YU H J, et al. Analysis for driving forces and ecological risk assessment of soil salinization in the Yellow River Delta[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(4): 508-516. 曹建荣, 徐兴永, 于洪军, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化原因分析与生态风险评估[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 508-516.
- [11] LI G Q, CHEN S L, PENG J, et al. Sedimentary environment analysis of drilling core YDZ1 from the Yellow River Delta[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(2): 205-212. 李谷祺, 陈沈良, 彭俊, 等. 黄河三角洲 YDZ1 孔沉积环境分析[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(2): 205-212.
- [12] CHENG G D. Modern sedimentation and mode of Yellow River Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 成国栋. 黄河三角洲现代沉积作用及模式[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [13] Ministry of Construction of the PRC. Code for Investigation of Geotechnical Engineering GB 50021—2001[S]. Beijing: China building industry press, 2009. 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范 GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [14] FANG X W, SHEN C N, LI C H, et al. Quantitative analysis of microstructure characteristics of Pucheng loess in Shannxi Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1917-1925. 方祥位, 申春妮, 李春海, 等. 陕西蒲城黄土微观结构特征及定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1917-1925.

- [15] MANDELBROT B P. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman.
- [16] MOORE C A, DONALDSON C F. Quantifying soil microrstructure using fractals[J]. Geotechnique, 1995, 1(45): 105-116.
- [17] GEODDARD J D. Nonlinear elasticity and pressure-dependent wave speeds in granular media[J]. Proceeding of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1990, 430: 105-131.

Microstructure Characteristics of the Disturbed Silt on Subaqueous Delta of Yellow River

JIAO Peng-fei^{1,2}, SUN Yong-fu^{1,2}, LIU Xiao-yu^{1,2}, SONG Yu-peng^{1,2}, DONG Li-Feng^{1,2},
CAO Cheng-lin^{1,2}, ZHANG Wei-Peng^{1,2,3}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China;*

3. *School of Civil Engineering and Mechanical, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Disturbed silt is widely distributed in the subaqueous delta of the Yellow River, contrasting with undisturbed silt it is different in microstructure. Based on the technologies of sub-bottom profiler Probe, Drilling Sampling and SEM and Image Process, we studied the microstructural characteristics of the disturbed silt. It turns out that compared with the undisturbed silt there are lots of differences in microstructure, grain composition, quantitative parameters. Two silt are skeletal structure, but disturbed silt particles focus on direct contact and separated from each other by the same particles. Compare with the undisturbed silt, disturbed silt have coarser particles, lower void ratio, higher moisture content, higher saturation, higher specific gravity, lower circularity and higher fractal dimension. At the same time, we discussed the formation mechanism, microstructural difference and the engineering geological properties of disturbed silt. The wave action is the main factor for the formation of disturbed silt, and under the influence of it, the pore water seepages taking fine particles out and the particles re-arrange, which leads to the change of micro structure and engineering geological properties of silt.

Key words: disturbed silt; microstructure; quantitative analysis; wave action; seepage action; particles re-arrangement

Received: February 22, 2017