

黄河三角洲沉积物抗侵蚀性动态变化差异研究

郑杰文^{1,2}, 贾永刚^{1,2}, 刘晓磊^{1,2}, 单红仙^{1,2}, 杨忠年^{1,2}

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院环境岩土工程研究所, 山东 青岛 266003;

2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266003)

摘 要: 为研究波浪循环荷载作用过程中, 细粒土沉积物抗侵蚀性特征的演化及其发生机制, 在现代黄河三角洲北部及东北部选择两个典型研究区(遭受严峻侵蚀的车子沟渔村试验区及基本处于侵蚀平衡的黄河海港试验区)进行了一系列波浪荷载模拟试验、侵蚀水槽试验及沉积物物理力学性质测试。试验结果发现: 原车子沟渔村试验区沉积物抗侵蚀性在无波浪荷载作用或较短的波浪荷载作用条件下, 普遍高于黄河海港研究区, 但由于其更显著的液化特性, 该区沉积物抗侵蚀性更容易被波浪荷载作用降低, 这是造成车子沟渔村研究区遭受严峻潮滩侵蚀的重要原因。另外, 结合试验结果, 对两个研究区沉积年代及沉积物粒度成分特征的分析可知, 波浪荷载作用导致海床下部细粒物质向上输运这一次生改造作用加速了海床沉积物的“粗化”进程, 从而推进海岸带地区细粒沉积物抗侵蚀性特征的演化。

关 键 词: 波浪荷载; 临界剪应力; 起动流速; 物理力学性质; 土体液化

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Discrepancy of sediment erodibility variation under waves at Yellow River delta

ZHENG Jie-wen^{1,2}, JIA Yong-gang^{1,2}, LIU Xiao-lei^{1,2}, SHAN Hong-xian^{1,2}, YANG Zhong-nian^{1,2}

(1. Environmental Geotechnical Engineering Institute, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract: Two typical study areas (Chezigou fishing village subjected to serious erosion process and Huanghe Haigang remaining in the balanced state between erosion and siltation) were selected to conduct a series of experiments including wave-loading simulations, flume erosion tests and geotechnical tests aiming at studying the erosional characteristic evolution of fine sediment in the process of wave loading actions and exploring the evolutionary mechanism. It is demonstrated that the sediment erodibility at Chezigou fishing village study area is widely higher than that at Huanghe Haigang both in the absence of wave action and weak wave conditions; however, with a more evident downward trend under wave loading due to the more significant liquefaction characteristics of fine soils in Chezigou fishing village, which can contribute to the serious coastal erosion this study area subjects to. Additionally, basing on the analysis of the sedimentation data and particle composition of the fine sediments in the two study areas, the reworking of wave loading to transport fine particles of the bottom sediment upward accelerates the coarsening process of seabed sediment, which promotes the evolution of sediment erodibility of fine soils in coastal areas.

Key words: wave loading; critical shear stress; threshold velocity; physico-mechanical properties; soil liquefaction

1 引 言

现代黄河三角洲自 1855 年黄河改道注入渤海开始发育至今已有 155 年的历史, 除现行河口及附近区域, 其他废弃河口区域都遭受过或正在经历不同程度的海岸侵蚀, 在泥沙补给断绝的条件下, 海洋动力要素(波浪、流、潮汐等)成为海岸演化的

主导因素^[1]。岸滩沉积物侵蚀的发生离不开海洋动力要素提供的破坏力, 然而与区域沉积物自身具有的抗侵蚀性也密切相关^[2]。现代黄河三角洲的沉积泥沙都来自起源于青藏高原的世界级高含沙量大河——黄河, 经历了不同沉积年代与沉积环境的三角洲叶瓣沉积物表现出不同的区域特色。在 Meng 等^[3]沿三角洲岸线的现场侵蚀调查中发现, 不同区

收稿日期: 2010-12-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40876042, No. 41072215); 国家 863 项目 (No. 2008AA09Z109)。

第一作者简介: 郑杰文, 女, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事河口沉积物动力响应方面的研究工作。E-mail: jiewenzheng@126.com

通讯作者: 贾永刚, 男, 1965 年生, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事河口海岸带地质灾害方面的研究工作。E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

域的三角洲叶瓣沉积物表现出不同的抗侵蚀及物理力学特征, 这与泥沙堆积后海洋动力对沉积物的后期改造作用是分不开的。

近年来, 许多科研工作者对三角洲沉积物动力响应已开展很多现场及室内研究工作, 特别是对波浪荷载在岸滩沉积物演变过程中所扮演角色的探究方面。单红仙等^[2, 4-5]通过现场取样室内分析, 研究了水动力条件对沉积物微结构影响及波浪荷载导致底部沉积物细粒物质向上输运以及高能量循环荷载对沉积物抗侵蚀性改造; 贾永刚等^[6]通过室内外试验研究了外界循环荷载对沉积物物理力学性质及起动流速的影响; 张民生等^[7]通过室内模拟试验研究了波浪作用导致沉积物液化并探究了三角洲粉质底床铁板砂的成因。许多研究工作表明, 波浪荷载对沉积物的改造作用是显著但复杂的。

本文在现代黄河三角洲选择了两个典型研究区——位于三角洲北部面临严峻侵蚀现状的原车子沟渔村研究区(现已被海水淹没)以及位于三角洲东北部趋于侵蚀淤积平衡状态的黄河海港研究区, 通过开展一系列现场试验, 主要包括波浪荷载模拟、侵蚀水槽试验及物理力学性质测试, 对波浪荷载作用过程中岸滩细粒土沉积物抗侵蚀性动态变化特征及其动态响应机制进行了研究; 对黄河三角洲北部车子沟试验区遭受严峻侵蚀的成因进行了探究。

2 研究区概况

现场两个试验点分别位于现代黄河三角洲中段潮滩面趋于平衡阶段的黄河海港(图 1 标记 S1 处)及三角洲北部强烈侵蚀岸段—原车子沟渔村(图 1 标记 S2 处)。黄河海港一带为 1953 年 7 月至 1963 年 12 月间黄河入海神仙沟流路入海口, 此处潮滩是 1964—1976 年黄河由刁口流路入海时沉积形成。该区岸段为不正规半日潮, 平均潮差为 0.7~1.7 m, 潮流性质属不正规半日潮流, 流速一般在 10~20 cm/s, 波浪以风浪为主, 正常海况下波高小于 0.5 m。车子沟渔村位于黄河亚三角洲叶瓣之上, 是 1904—1929 年的黄河入海口, 此后黄河改道宋春荣沟等流路沉积形成, 此区域也属于不正规半日潮区, 平均潮差为 1.27 m 左右, 涨潮流方向为 SN 向, 落潮流方向为 NW 向, 主流向与岸线平行, 潮流的运动形式为往复流。该区波浪以风浪为主, 受渤海海域风的季节性影响明显, 波浪要素分布具有明显季节性特征, 常浪向为 NE, 强浪主要来自 NNE—ENE, 尤以 NE 向最强, 其次为偏 NW 向^[8]。该区缺乏泥沙补给, 在潮汐、波浪和风暴潮等海洋动力的作用下侵蚀严重, 2008 年 7 月 30 日至 2008 年 9 月 30 日两个月期间, 在无极端海况条件下, 海岸线后退 2.5 m^[9]。黄河海港和车子沟渔村两个研究区表层沉积物常规物理力学性质、水理性质及粒度成分见表 1。

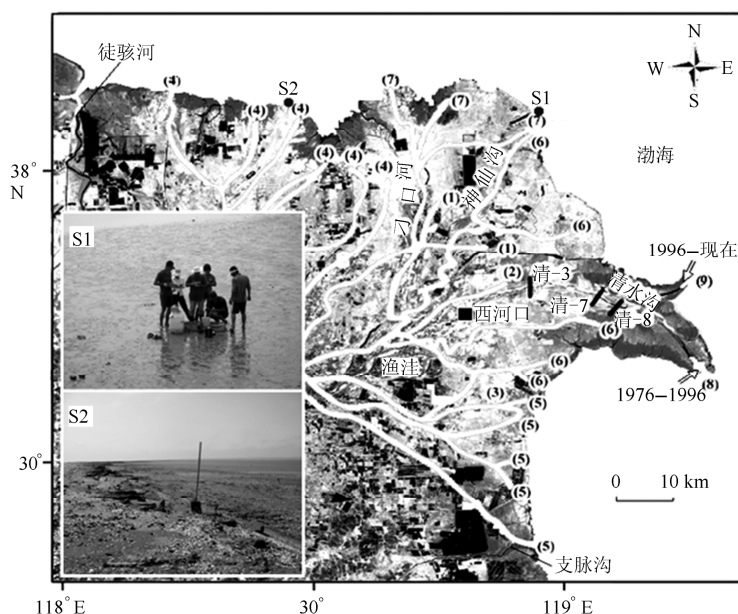


图 1 研究区位置图 (S1: 黄河海港; S2: 车子沟渔村)

Fig.1 Location of the study area (S1: Huanghe Haigang; S2: Chezigou fishing village)

表 1 黄河海港与车子沟渔村两个研究区表层沉积物常规物理性质及粒度成分特征
Table 1 Routine physical properties and granularity composition of surficial sediment at the two study areas of Huanghe Haigang and Chezigou fishing village

研究区位置	重度 (kN/m^3)	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	不均匀 系数	曲率 系数	平均粒径 /mm	粘粒含量 /%	粉粒含量 /%	砂砾含量 /%
黄河海港	19.5	26.7	26.30	16.50	10.02	1.57	0.027	19.3	78.1	2.6
车子沟渔村	19.7	30.4	25.80	16.08	9.59	1.41	0.051	7.8	81.4	10.8

3 现场试验

3.1 波浪模拟试验

在黄河海港和车子沟渔村两个研究区均选择平坦且无生物活动潮滩区为试验点, 平行试验点 7 组, 进行波浪模拟试验 (图 2(a)), 施加波浪循环荷载, 循环振动次数分别为 0、10、20、30、40、50、60, 模拟波浪幅值为 4 kPa, 模拟波浪荷载试验装置示意图见图 2(b)。波浪模拟试验进行之前先将一环形护壁插入海床中 10 cm, 缓慢注入当地海水, 直至水深达 20 cm, 慢慢提起, 而后轻轻推动手柄带动活塞对海床施加波浪荷载。

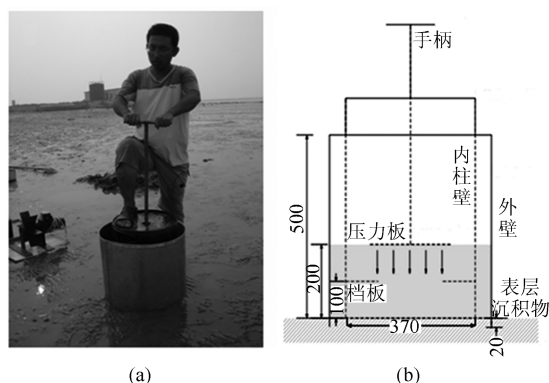


图 2 波浪模拟试验装置 (单位:mm)

Fig.2 Testing apparatus of wave-producer(unit: mm)

安置于沉积物表层的孔压传感器显示的数据表示模拟波浪荷载振动试验过程中海床表面波压力变化情况 (图 3)。该方法详细开展过程可参见文献 [9]。在海洋动力条件下, 行进中的波浪作用于海床, 会对海床表层沉积物产生两个作用力效果, 即水平剪切力和垂向循环变化的波压力。水平剪切力诱发海床沉积物的侵蚀悬浮过程, 但对沉积物自身性质的改变并不显著, 能够影响沉积物自身抗侵蚀特性的是垂向循环波压力。本文通过自行设计造波装置单一模拟研究这种循环波压力对粉质土沉积物抗侵蚀性的改造作用。

3.2 水槽侵蚀试验

波浪模拟试验结束静置 5 min 后, 取走造波装置, 拔出护壁, 缓慢放出其中海水, 在经过波浪荷

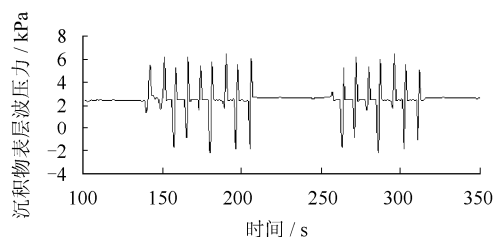


图 3 模拟波浪荷载振动过程中海床表面孔压变化 (部分)

Fig.3 The pore water pressure change at the surface of seabed during the vibration of simulative wave load (portion)

载作用后的沉积物上进行取样、物理力学性质测试及水槽侵蚀试验 (见图 4)。该装置依照可移动循环水槽^[10]设计和制造。水槽由 0.10 m 宽跑道型水道组成, 水流由旋转轮带动, 水槽长为 1.20 m, 宽为 0.50 m, 高为 0.15 m。在水道弯曲部分, 设置两个层流变流装置, 使水流变直, 将横向流非均匀减到最少。水道下游设置侵蚀断面, 长为 0.25 m, 宽为 0.08 m, 与海床表层沉积物接触测试沉积物抗侵蚀性。

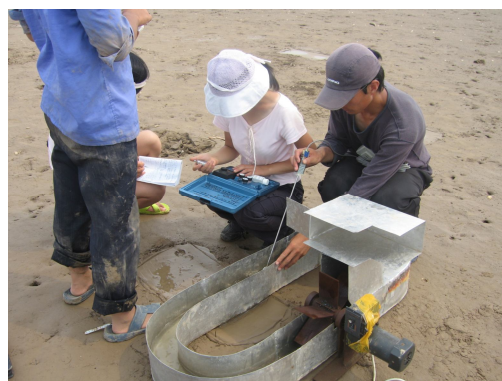


图 4 水槽侵蚀试验

Fig.4 Flume erosion experiment

循环水槽安置好后, 向其中缓缓注入海水, 通过设定电动机档数改变转轮转速, 实现不同侵蚀流速。在本试验中, 由 12 V 蓄电池供电, 通过电源转换器将直流电变为交流电带动电机工作。侵蚀试验过程中采用 LGY—II 型智能流速仪进行流速测定, 每个侵蚀试验进行 3 组不同流速条件下的抗侵蚀性测定。每一个流速条件下, 控制侵蚀时间在 5 min 左右, 采用秒表计时。

沉积物的侵蚀量通过测量浊度计算得到, 本实验中采用 TURB335IR 型浊度仪进行浊度测试。浊度测试人工采样间隔在 20 s 左右。侵蚀试验进行完毕, 对浊度进行标定, 计算不同流速条件侵蚀通量。

对于起动流速的确定, 不同的学者采用不同的确定方法^[11-14], 本文采用 Neumeier 等^[11]的思路, 建立流速与侵蚀通量回归曲线, 代入初始侵蚀通量值, 即得到沉积物起动流速。沉积物临界剪切应力确定采用 Keulegan^[15]提出的二维明渠紊流中速度沿垂线分布的对数型估算公式:

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_*} = 5.5 + \lg\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) \quad (2)$$

式中: τ_0 为底床临界剪切应力; ρ 为海水密度; u_* 为摩阻流速; u 在本试验中为侵蚀起动流速; y 由流速计探头位置决定; ν 为海水动力黏滞系数。

3.3 土工指标测试

模拟波浪循环荷载作用结束, 在侵蚀区邻近区域进行环刀及铝盒取样, 在现场分别用电子天平及烘箱测试不同条件的循环荷载作用后沉积物重度及含水率的变化值。具体过程如下: 表层沉积物重度通过环刀直接贯入海床, 取出原状土样, 削平两端称重测得; 含水率通过铝盒取样烘干测得。粒度分析采用筛分及密度计联合试验法。贯入强度采用中国沈阳自动化仪表研究所制造的电子数显微型贯入仪测试。剪切强度使用的是中国沈阳建科仪器研究所生产的袖珍十字板剪力仪。物理力学性质测试值均通过 3 组平行测试试验取平均值确定。

4 数据分析及讨论

4.1 研究区细粒土抗侵蚀性动态变化对比分析

单红仙等^[2]通过室内物理模拟试验发现动三轴循环气压荷载能够降低沉积物的抗侵蚀性, 这与本文两个试验点进行的现场试验结果是一致的, 然而与其室内试验得到的良好负线性关系相比, 黄河海港和车子沟渔村两个试验点表层沉积物的起动流速及临界剪切应力均随着波浪荷载循环次数的增加呈现出波动型非线性降低 (图 5、6), 这与波浪荷载的幅值域及沉积物的性质密切相关^[6]。从图 5、6 可以发现, 车子沟渔村试验区沉积物抗侵蚀性随着循环荷载增加而逐渐降低的过程中, 在振次 60 处反而出现明显回升, 这与进行振次 60 选择的试验点表层沉积物的差异性状是分不开的。在选择平行测试点时, 本试验只测试了物理力学性状参数并排除生物扰动因素, 然而其他因素, 如有机含量、化学胶结

等土质条件的差异也可能导致沉积物抗侵蚀性发生变化。尽管两个现场两个试验点均位于现代黄河三角洲北部 (图 1), 沉积泥沙均来源于高含沙量大河——黄河, 然而细粒土沉积物抗侵蚀性在波浪荷载作用下, 却表现出不同的行为模式。一方面, 车子沟渔村试验点抗侵蚀性在绝大多数波浪条件下均不同程度地高于黄河海港试验点 (图 5、6)。两个研究区沉积物抗侵蚀性差值最高时, 前者起动流速是后者的 2.5 倍 (18.96 : 7.58), 临界剪切应力是后者的 4.9 倍 (0.113 : 0.023)。另一方面, 尽管车子沟渔村试验区沉积物抗侵蚀性在波浪荷载作用下的整个演变过程中, 在本试验条件范围内, 普遍高于黄河海港研究区, 然而从图 7 中却可以看出, 由于波浪的荷载效应, 车子沟渔村试验区细粒土沉积物抗侵蚀性的降低程度普遍高于黄河海港研究区, 这不仅显示在图 7 柱状图中, 从对两个研究区沉积物抗侵蚀性变化幅值指标线性拟合曲线的变化趋势中也可以看出。车子沟渔村试验区起动流速及临界剪切应

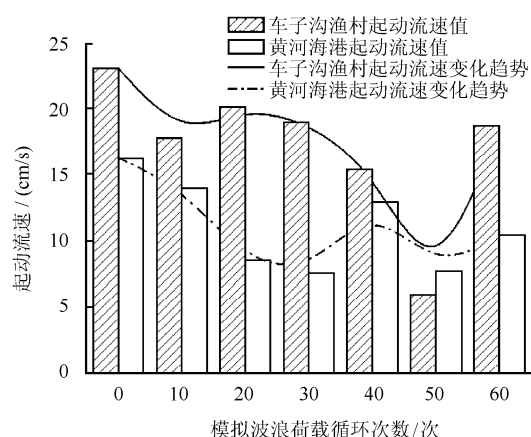


图 5 研究区细粒土起动流速动态变化
Fig.5 Variations of threshold velocity of fine soil at the two study areas

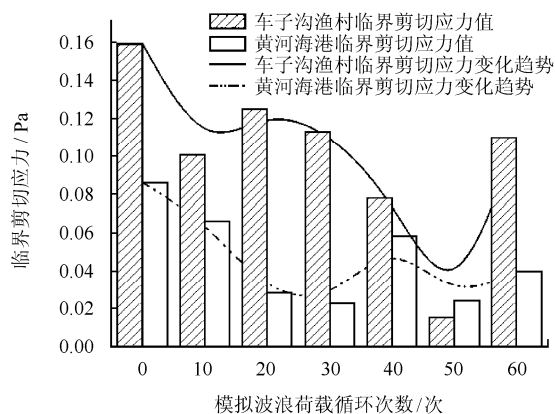


图 6 研究区细粒土临界剪切应力动态变化
Fig.6 Variations of critical shear stress of fine soil at the two study areas

力增量与波浪荷载循环振次的负线性拟合曲线相关系数均高于黄河海港试验区(图 7), 这说明了波浪荷载作用对车子沟渔村试验点沉积物抗侵蚀性的改造作用明显高于对黄河海港沉积物抗侵蚀性的改造作用, 这与两个研究区沉积年代^[3]及沉积物后期性质的分异及粒度成分的变化是分不开的^[5]。

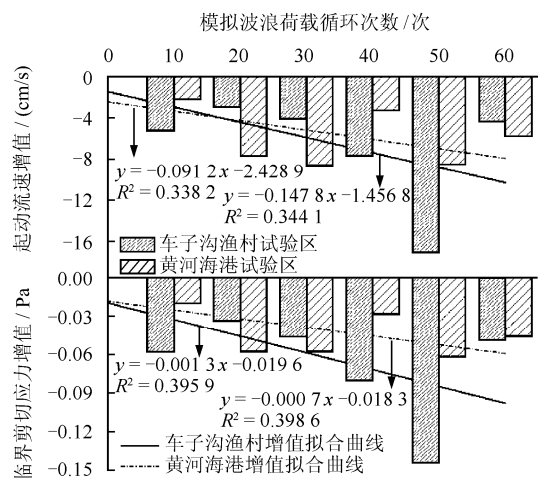


图 7 研究区细粒土抗侵蚀性变化幅值(起动流速增量、临界剪切应力增量)动态变化

Fig.7 Variations of anti-erosion incremental amplitude (increment of threshold velocity and increment of critical shear stress) of fine soil at the two study areas

4.2 研究区细粒土物理力学性质动态变化对比分析

如图 8 所示, 车子沟渔村与黄河海港细粒土沉积物重度背景值接近, 前者含水率高于后者 3.73%。在整个波浪荷载作用过程中, 两个研究区沉积物重度变化不十分明显(图 8), 但是从图 9 中可以看出, 两个研究区含水率均存在不同程度的波动。从现场的观测中可以看出, 波-土相互作用过程中表层沉积物发生不同程度液化, 并且车子沟渔村试验区细粒土沉积物液化敏感度明显高于黄河海港研究区, 这是导致该研究区含水率发生较大幅度变化的一个重

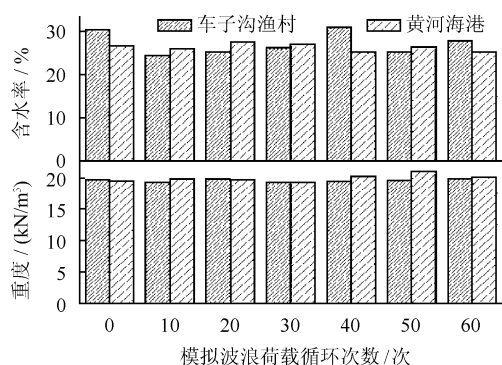


图 8 研究区细粒土重度、含水率动态变化

Fig.8 Variations of bulk density and moisture content of fine soil at the two study areas

要因素。

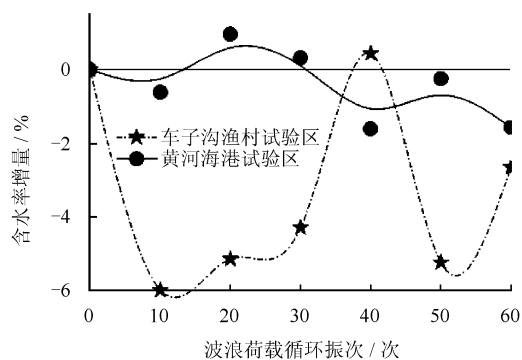


图 9 研究区细粒土含水率增量动态变化

Fig.9 Variations of moisture content increment of fine soil at the two study areas

两个研究区力学性质(剪切强度、贯入强度)差异非常显著(图 10), 具有更长沉积年代的车子沟渔村试验点, 其表层沉积物贯入强度仅为 0.8 N, 比晚 40 多年沉积的黄河海港沉积物贯入强度低 83.6%, 剪切强度前者比后者低 66.9%。这一发现表明河口三角洲表层沉积物强度特征与前期沉积年代关系并不明显, 而与后期沉积环境密不可分, 如, 波浪作用导致的黄河口粉土非均匀液化和触变^[4]。

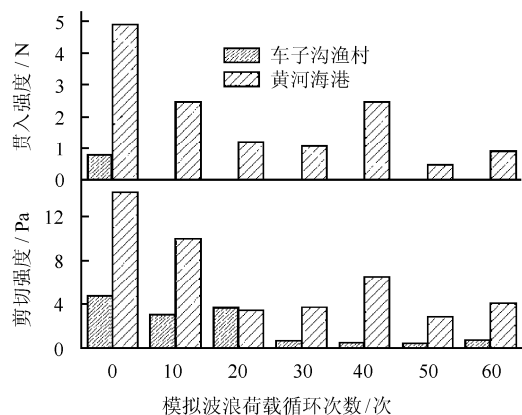


图 10 研究区细粒土剪切强度和贯入强度动态变化

Fig.10 Variations of shear strength and penetration strength of fine soil at the two study areas

贾永刚等在 1999—2002 年期间在刁口叶瓣现场调查结果表明, 从较长时间尺度而言, 高能量波浪荷载作用, 不会提高表层沉积物强度, 只加大沉积物的不均匀程度, 但可以提高一定深度范围内的土体强度, 形成强度硬层^[16]。从本文短时间尺度现场试验测试结果可以看出, 在车子沟渔村及黄河海港两个试验点, 幅值 4 kPa 的波浪荷载明显降低了两个试验区细粒土沉积物的强度力学特性, 只是对于不同振次条件的波浪荷载, 两个试验点表层沉积物强度降低程度不同, 特别是在车子沟渔村, 波浪

荷载作用后, 贯入强度均降低为 0, 剪切强度在波浪循环振次大于 30 的条件下也降低到很小值, 相比于黄河海港, 车子沟渔村表层沉积物对波浪荷载的衰减作用表现出更强的敏感度, 这与该区沉积物极易液化的细粒土性质是分不开的。沉积物液化后, 颗粒悬浮或似悬浮于孔隙水中, 呈现出不同形态及厚度的流态泥层及小型泥火山, 这一现象在张民生等^[7]进行的室内模拟试验中也有发现。

4.3 研究区细粒土粒度成分动态变化对比分析

就背景值而言, 车子沟渔村试验点表层沉积物在 7.8% 左右, 仅为黄河海港的 40%, 砂粒含量在 10.8%, 是后者的 2.04 倍, 粉粒含量在两个研究区相差不大, 前者略高于后者, 平均粒径则前者明显高于后者 (图 11)。这一现象可从侧面证明波浪荷载作用导致下部细粒沉积物向上运输这一观点^[5, 7], 经过海流的携带作用, 细颗粒带走, 粗颗粒留下, 导致海床发生粗化。两个研究区前期输沙来源一致, 粒度成分组成可认为基本一致, 沉积物后期粒度成分的分异与波浪循环荷载进行细粒沉积物向上输运及潮流的泥沙运移密切相关, 波浪和潮流综合作用的结果就是海床沉积物的粗化。两个试验研究区相差 40 多年的沉积历史提供了足够长的时间差值背景, 车子沟渔村研究区经历更长时间的粗化过程, 导致其粒度成分粗粒含量明显高于黄河海港。

从图 11 中的粒度成分拟合曲线中也可以看出, 在波浪荷载作用过程中, 随着振次增加, 两个研究区表层沉积物黏粒含量有增加趋势, 砂粒含量有轻微降低趋势, 这说明在相同波浪荷载条件下, 细粒物质向上输运量随着作用时间的增长有增加的趋

势。基于本试验波浪荷载幅值域较小及作用时间较短, 从平均粒径上没有表现出降低的趋势。

4.4 细粒土沉积物抗侵蚀性特征演变机制分析

传统观点认为细粒沉积物抗侵蚀性与其物理性质有着密切的关系, 如重度、含水率、粒径尺寸等^[17], 波浪荷载的作用可以改变表层沉积物的物理性质^[6], 因此, 可以认为波浪荷载的作用对细粒土沉积物抗侵蚀性特征的演变起着至关重要的作用, 这一观点在本文中得到很好的证明。然而从试验结果中可以看出, 对于原车子沟渔村试验区 (黄河三角洲北部) 及黄河海港 (黄河三角洲东北部) 两个研究区, 由波浪荷载导致的沉积物抗侵蚀性特征演变规律并不相同 (图 5~7)。

在短时间尺度的试验条件内, 小幅值波浪荷载 (~4 kPa) 作用过程中前者沉积物抗侵蚀性普遍高于后者, 但是从波浪荷载导致沉积物抗侵蚀性降低程度上, 前者也高于后者。基于现场试验观测可以发现, 在原车子沟渔村研究区, 波浪荷载作用过程中表层沉积物极易液化, 黄河海港研究区则相对较弱 (图 9), 这与车子沟渔村研究区细粒沉积物中较多的砂粒含量有关 (图 11), 这也是车子沟渔村沉积物抗侵蚀性较高的一个重要原因。由此可以看出, 长期的波、流联合作用导致沉积物发生“粗化”^[5, 7]的结果是提高沉积物抗侵蚀性, 然而由于砂粒含量的增多也导致细粒土沉积物在波浪荷载作用过程中极易发生液化, 使强度大幅度丧失 (图 10), 从而使潮滩沉积物在水动力条件下极易被侵蚀。

细粒土沉积物抗侵蚀性特征在波浪荷载作用过程中的这种行为特征对黄河三角洲北部原车子沟

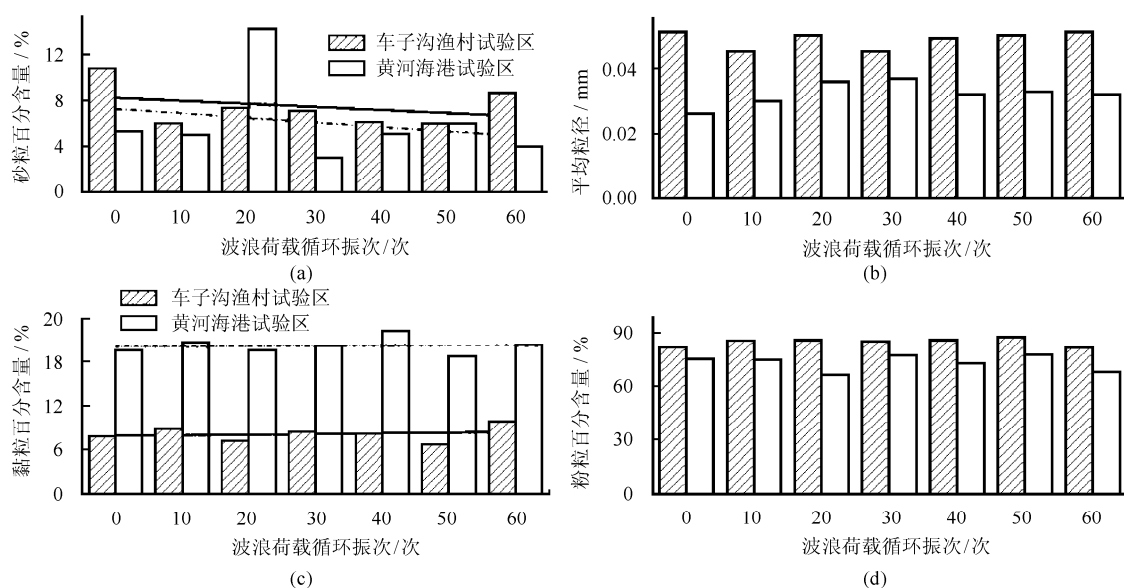


图 11 研究区细粒土粒度成分和平均粒径动态变化

Fig.11 Variations of granularity composition and average grain size of fine soil at the two study areas

渔村研究区正在遭受的严峻侵蚀现状以及东北部黄河海港研究区目前处于的侵淤平衡状态发挥着重要作用。尽管车子沟渔村试验区在无波浪荷载作用,或较弱波浪荷载作用较短的时间内,细粒沉积物表现出比黄河海港更高的抗侵蚀性,但是前者更容易液化,其抗侵蚀性在相同的强波浪荷载条件下或弱波浪荷载更长的作用时间内表现出更大幅度的降低,使其更容易被侵蚀。黄河海港研究区沉积物抗侵蚀性背景值虽然不高,但是在相同的波浪荷载作用条件下,沉积物液化程度较低,抗侵蚀性降低程度也明显低于车子沟渔村研究区。所以,造成车子沟渔村研究区与黄河海港研究区目前不同侵蚀状况的根本原因不是因为前者沉积物抗侵蚀性低于后者,而是因为前者沉积物抗侵蚀性更容易被波浪荷载减弱,对波浪作用具有更高的敏感度。

5 结 论

本文在现代黄河三角洲北部车子沟渔村研究区及东北部黄河海港进行了一系列波浪荷载作用条件下沉积物抗侵蚀性、物理力学性质及粒度成分动态变化测试,对细粒土沉积物抗侵蚀性特征演化及其发生机制进行了研究,并对两个研究区不同的海岸侵蚀现状成因进行了分析,得出以下结论。

(1) 在无波浪荷载作用或较短的波浪荷载作用条件下,位于黄河三角洲北部的原车子沟渔村试验区细粒土沉积物抗侵蚀性普遍高于黄河海港研究区,但由于车子沟渔村试验区沉积物更显著的液化特性,该区沉积物抗侵蚀性比黄河海港研究区更容易被波浪荷载作用降低。细粒土沉积物抗侵蚀性在波浪荷载作用过程中的这种行为特征对黄河三角洲北部原车子沟渔村研究区正在遭受的严峻侵蚀现状以及东北部黄河海港研究区目前处于的侵淤平衡状态发挥着重要作用。

(2) 波浪荷载作用能够使海床下部细粒物质向上输运,并且随着波浪荷载作用时间的增长,细粒物质输运量有增加的趋势。波浪荷载对细粒沉积物的这种改造作用加速了海床沉积物的“粗化”进程,从而推进沉积物抗侵蚀性特征的演化。

参 考 文 献

- [1] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸侵蚀机理及治理对策[J]. 水利学报, 2004, (7): 1—7.
CHEN Shen-liang, ZHANG Guo-an, GU Guo-chuan.
Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River

delta and its counter measures[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2004, (7): 1—7.

- [2] 单红仙, 郑杰文, 贾永刚, 等. 黄河口粉质土沉积物抗侵蚀性动态变化试验研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(4): 112—120.
SHAN Hong-xian, ZHENG Jie-wen, JIA Yong-gang, et al. Laboratory study about the influence of dynamic loading on the erosion of silty sediment in the Huanghe Estuary in China[J]. **Acta Oceanologica Sinica**, 2009, 31(4): 112—120.
- [3] MENG X M, JIA Y G, SHAN H X, et al. Tidal flat erosional features of the modern Yellow River delta[C]// Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu: ASME, 2009.
- [4] 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—659.
SHAN Hong-xian, LIU Yuan-yuan, JIA Yong-gang, 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—659.
- [5] 单红仙, 刘涛, 陈友媛, 等. 波浪荷载导致黄河口潮坪沉积物垂向运移现场观测研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 216—222.
SHAN Hong-xian, LIU Tao, CHEN You-yuan, et al. In situ measurement of vertical transfer of sediment in the silty seabed under wave loading in the Yellow River Estuary area[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2008, 16(2): 216—222.
- [6] 贾永刚, 栾海晶, 许国辉, 等. 振动导致黄河口粉质土性质与起动流速的变化[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1123—1129.
JIA Yong-gang, LUAN Hai-jing, XU Guo-hui, et al. Changes in geotechnical properties of silt and its critical erosion threshold in Yellow River Estuary: influence of vibrating load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1123—1129.
- [7] 张民生, 刘红军, 李晓东, 等. 波浪作用下黄河口粉土液化与“铁板砂”形成机制的模拟试验研究[J]. 岩土力学, 30(11): 3347—3353.