

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.02043

# 波浪作用下黄河口沉积物液化导致的灾害现象

常方强<sup>1,2</sup>, 贾永刚<sup>2</sup>

(1 华侨大学 土木工程学院, 泉州 362021; 2 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266110)

**摘要:**选择黄河口浅滩不同沉积历史的 4 个典型研究区, 取样进行室内物理力学参数测试, 现场利用普氏贯入仪测量 1 m 深度内土体强度在二维空间上的分布。然后, 建立波浪作用下土体破坏的计算模型, 计算 50 年一遇情况下土体破坏状况, 并与调查的浅滩灾害比较。通过研究发现, 黄河口浅滩沉积物处于超固结状态, 且超固结比随深度增加而减小; 浅滩沉积物强度在空间上表现出较强的非均匀性, 大王北和刁口地区沉积物的强度要大于新滩和广利港地区的; 沉积物在 50 年一遇波浪荷载下局部液化破坏深度可超过 90 cm, 土体强度的空间非均匀性导致液化破坏后形成灾害现象。计算得到的灾害与现场调查结果具有一定的相似性, 测试方法和计算方法可定量分析黄河口浅滩沉积物灾害的形成与特征。

**关键词:**浅滩; 灾害; 液化; 黄河口

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

文章编号: 0256-1492(2011)02-0043-06

黄河水下三角洲是由黄河携带的大量泥砂快速堆积在河口地区形成的, 常存在超孔压, 强度较低。冬春两季, 盛行的东北风引起巨大波浪, 导致土体破坏, 形成一系列灾害现象。这些灾害对于该区的石油设施安全性造成威胁。

关于灾害形成过程, 大都从定性角度进行描述, 许国辉等<sup>[1]</sup>认为灾害的形成受控于海底浅表土体的强度特征, 在水动力作用下浅表土体强度弱区形成坍塌洼地; 李广雪等<sup>[2]</sup>利用声纳等仪器调查黄河口海床发育的地质灾害, 发现该区存在多种灾害形式; Prior 等<sup>[3]</sup>现场观测黄河口海底沉积物破坏过程; 灾害的形成与该区土体性质的非均匀性有关, 周其健等<sup>[4]</sup>从土体固结角度分析沉积物非均匀性产生的机制, 认为非均匀性是由于波浪荷载作用下土体固结形成的。

然而, 对于黄河口浅滩灾害现象形成过程的定量解释, 目前仍是空白。因此, 本文首先在现场测试海床土体的性质特征, 建立土体破坏数学计算模型, 计算极端海床下浅滩灾害形成的特征, 对于预测灾害的形成过程和指导石油工程设施的合理设计具有指导意义。

## 1 方案设计

基金项目: 华侨大学高层次人才科研启动项目(09BS621); 国家自然科学基金项目(40876042); 国家“863”攻关项目(2008AA09Z109)

作者简介: 常方强(1980—), 男, 博士, 讲师, 从事环境岩土灾害研究及教学工作, E-mail: malcme@126.com

收稿日期: 2010-07-22; 改回日期: 2010-09-10。 张光威编辑

### 1.1 研究区概况

黄河每年在河口地区沉积的土体达  $1.06 \times 10^9$  t, 绝大多数沉积在河口地区, 形成鸟嘴状的复杂体系。该区水深较浅, 大多在 0~18 m 之间, 最深处不超过二十几米。水下斜坡坡度极缓, 常小于 1.2°, 距岸 10 余千米的海域, 水深只有十几米, 退潮时数千米的潮滩露出水面。

沉积物沉积历史与其性质有重要关系, 现场测试选择不同沉积年代的浅表土体, 分别为大王北、刁口、新滩和广利港。4 个研究区分别为 1904—1929、1964—1976、1976 年至今和 1929—1934 年黄河入海流路形成的三角洲叶瓣<sup>[5]</sup>, 其地理位置如图 1 所示。

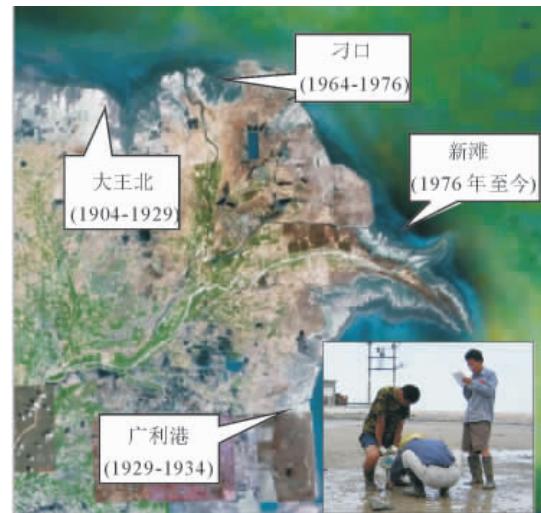


图 1 黄河口 4 个研究区地理位置

Fig. 1 Location of the four study areas

## 1.2 试验测试仪器

研究区沉积物的强度测试,采用沈阳建科仪器研究所生产的WG-11型手持电子普氏贯入仪,又称为微型静力触探仪,测杆直径为16 mm,探头锥角30°,最大量程为1 500 N,灵敏度为0.01 N,最大贯入深度为1.2 m。贯入过程中,需3人配合完成,1人贯入仪器,1人控制贯入深度、读数,一人记录,如图1所示。贯入过程连续,保持速度为1 cm/s。

## 2 沉积物性质测试结果

### 2.1 室内物理力学参数

原位取1 m深度的土体进行室内土工试验测试,分析沉积物的矿物成分、粒度组成和物理指标,其中刁口和新滩地区的试验结果为:

(1) 主要矿物成分为石英、长石、方解石、白云石和部分黏土矿物,碎屑矿物含量为70%~80%。其中,石英含量最大,约占40%,其次为长石,约占20%,方解石约占10%,白云石最少,只有1%~3%的含量<sup>[6]</sup>。

(2) 经粒度分析,沉积物中砂粒、粉粒和黏粒均有一定的含量,砂粒含量相对较小,平均约为16%;粉粒占多数,含量为44%~87%;黏粒含量相对较小,平均约5%。

(3) 沉积物的含水量为21.8%~30.5%,平均值为24.8%;饱和度为86%~100%,基本处于完全饱和状态;刁口地区压缩模量为6.2~14.3 MPa,新滩为3.5~5.6 MPa,压缩性中等,且随着深度的增大,压缩性有所降低;对超固结比的测定表明,黄河口浅滩地区处于明显的超固结状态,随着深度增大呈现衰减,并且刁口地区的超固结比明显大于新滩地区的。

### 2.2 现场强度测试结果

待低潮时,在4个研究区选择平坦区域进行贯入试验。试验选择1条测线,水平向每隔10 m贯入1个点测量,竖向上每隔5 cm记录1次读数,这样构成水平向10 m、竖向5 cm的二维空间强度分布图。4个研究区的测试结果如图2所示。

从图2中可以看出,土体强度在空间上表现出较强的非均匀性,在相同深度内,沿测线不同长度处强度有所差异。大王北地区在测线80 m和200 m左右表现出较高的强度,而在其他位置处强度相对

较低。将4个研究区的强度进行比较,可以发现大王北和刁口地区的强度较高,最大值超过1 000 N,而新滩和广利港的相对较低,最大值约为700~800 N。究其原因,这是因为大王北和刁口地区位于三角洲的东北部,春冬两季的东北风引起的波浪直接作用于此位置,较强的波浪作用改造土体的性质。一方面波浪动力使得软弱区域土体液化侵蚀,底部较高强度土体裸露,表现为强度较高;另一方面未液化土体压缩排水,土体孔隙减小,密实度增大,强度增大。而新滩和广利港地区不受东北风引起波浪的直接作用,所受的水动力作用要小于大王北和刁口两个地区的。

## 3 土体破坏计算模型

波浪对海床土体的作用有二,一是波浪力直接对海床表面产生剪应力,土体发生侵蚀破坏;二是波浪力引起海床内部的附加循环应力,使得土体产生液化,强度降低,加速侵蚀过程。实际情况下,两者同时发生作用,并且后者加速前者的进程。

波浪对海床表面的剪应力可按下式计算:

$$\tau = \frac{1}{2} f \rho \mu^2 \quad (1)$$

式中,f为波浪与底床的摩擦系数;ρ为海水密度;μ为波浪在海床地面的速率。

通常情况下,波浪对海床表面的剪应力仅为几帕,而土体具有的不排水抗剪强度达几千帕,即 $\tau << \tau_c$ ,因此,海床表面的剪应力难以使得土体发生破坏,故土体发生破坏的主导因素由液化所致。

土体液化破坏的计算模型在文献[7]中有详细描述,主要计算波浪在海床内引起的循环应力比(cyclic stress ratio, CSR)和土体本身具有的循环阻抗比(cyclic resistance ratio, CRR),当前者大于后者时,土体发生液化破坏。循环应力比表示为:

$$CSR = \frac{(\tau_{vh})_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{2\pi}{\rho' g} \frac{P_0}{L} \exp(-\frac{2\pi z}{L}) \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{\rho_w g H}{2 \cosh(2\pi d/L)}$$

式中,z为沉积物的深度, $\rho'$ 为水下有效密度, $\rho' = \rho - \rho_w$ , $\rho_w$ 为海水密度,g为重力加速度,H为波高,d为海水深度。

循环阻抗比可以利用现场测试参数建立经验公式,Nataraja和Gill<sup>[8]</sup>建立海洋工程中波浪荷载作用下循环阻抗比与修正标贯击数的关系为:

$$CRR = 0.009 N_1 \quad (3)$$

式中, $N_1$ 为修正的标贯击数。

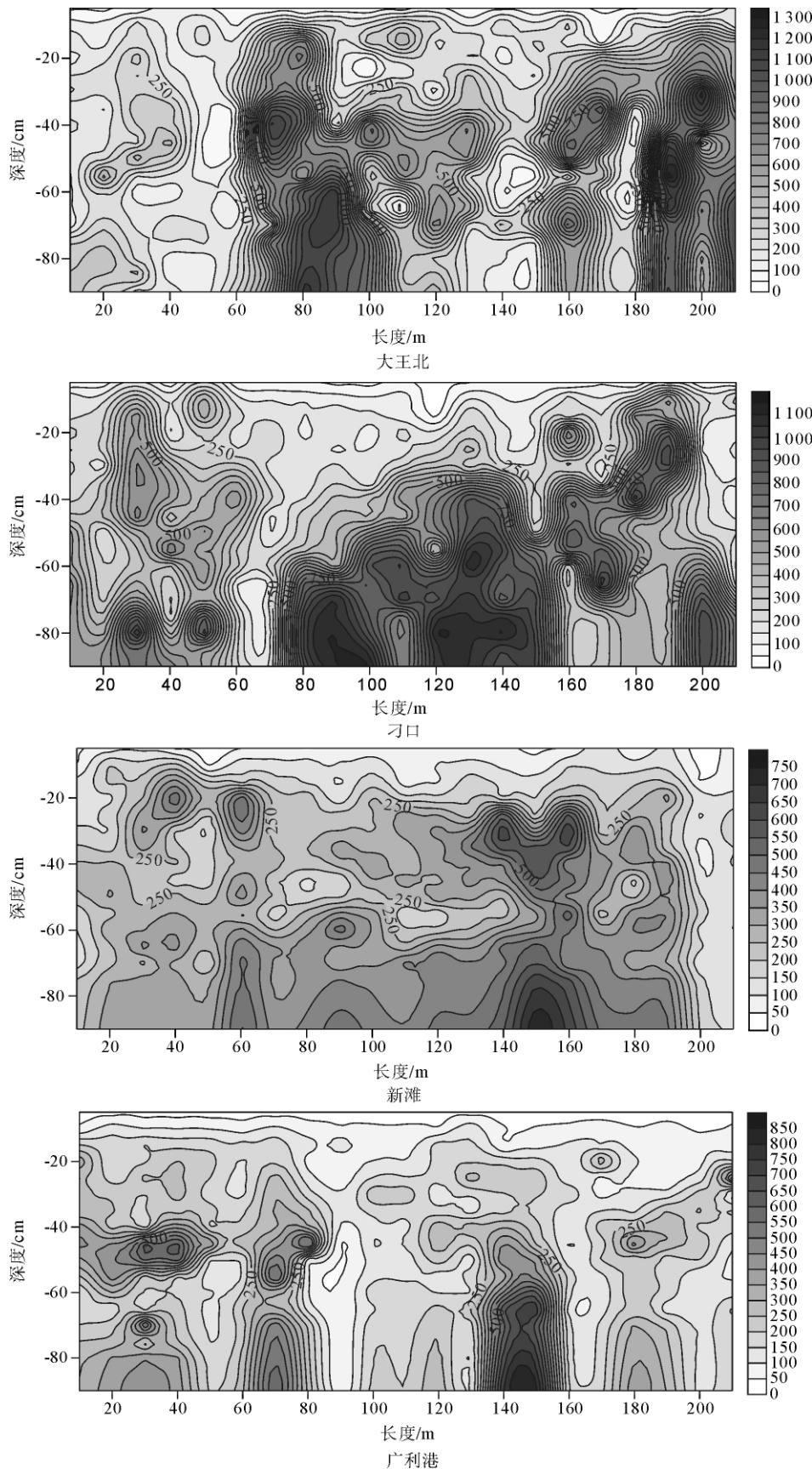


图 2 黄河口 4 个研究区的贯入试验测试结果

Fig. 2 The strength at four study areas measured by Proctor Penetrometer

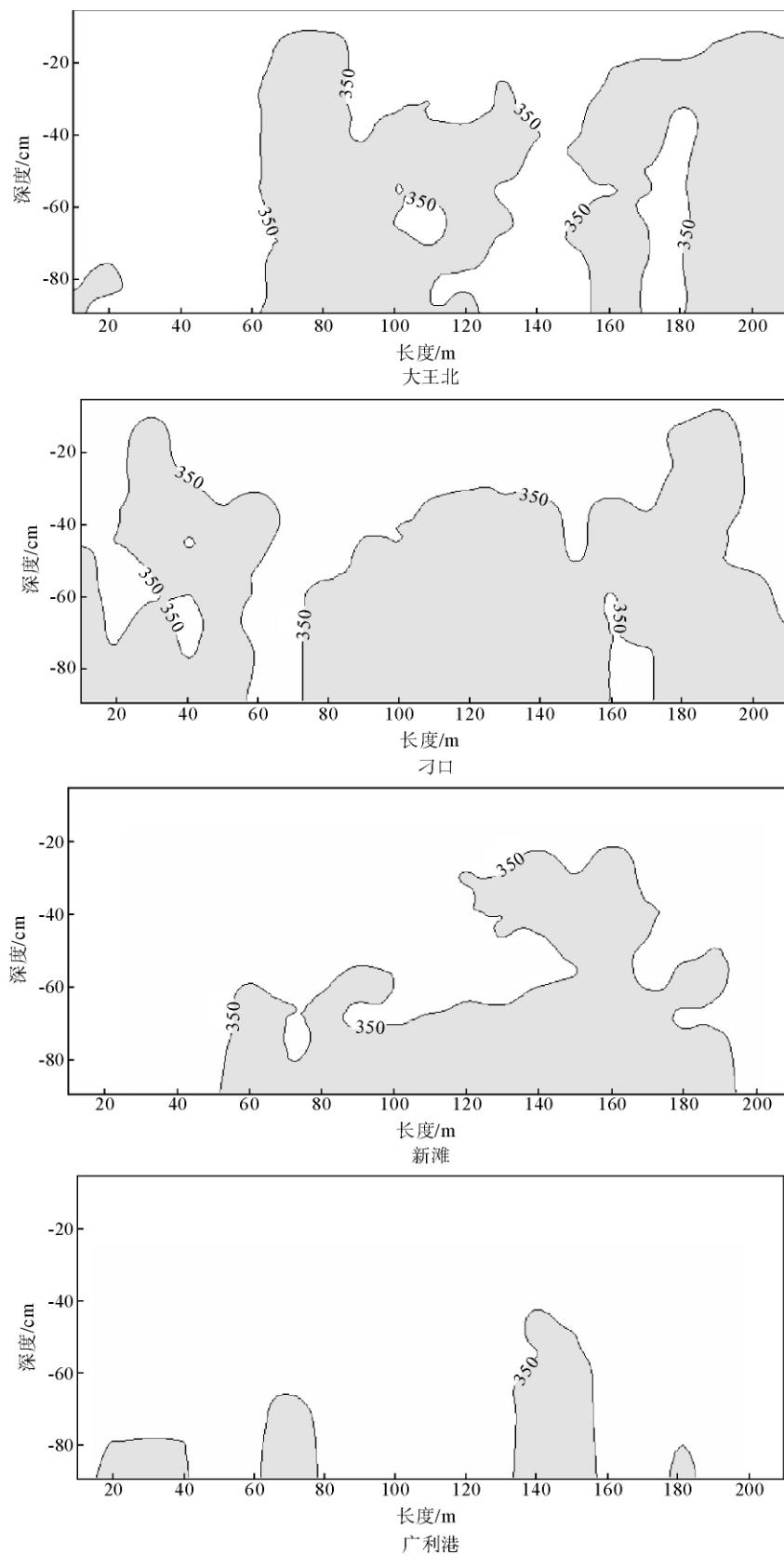


图 3 黄河口 4 个研究区液化破坏后形成的灾害现象(图中 350 为土体贯入强度 350 N)

Fig. 3 Disasters after liquefaction failure at the four study areas(350 means the soil penetration strength 350 N)

标贯击数的修正是为了考虑实测击数随上覆有效应力的增加而增加,因此,将不同埋深条件下的

标贯值修正为同一上覆应力条件下。参照我国《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89)方法,拟合出  $C_N$

的计算公式为:

$$C_N = 1.82 \exp(-0.49\sigma'_v/P_a) \quad (4)$$

式中,  $\sigma'_v$  为有效上覆应力 (kPa);  $P_a$  为参考应力 (100 kPa)。

根据黄河水下三角洲地区的原位测试资料, 可建立标贯值  $N$  与普氏贯入仪的贯入强度  $q_p$  的经验关系:

$$N = (q_p - 26.97)/29.54 \quad (5)$$

式中,  $q_p$  为贯入强度 (N)。整理式(3)和(5)可求出循环阻抗比与普贯强度的关系, 两者呈线性关系, 关系式为:

$$CRR = C_N (3.05 \times 10^{-4} q_p - 0.0082) \quad (6)$$

风暴期间, 波浪在海床内引起的循环应力比等于或者大于土体的循环阻抗比, 即  $CSR \geq CRR$  时, 土体发生液化, 反之不会液化。

## 4 灾害形成计算

计算 50 年一遇波浪情况下灾害的形成过程。极端海况下, 潮滩水深可迅速激增, 一般可达 3~10 m<sup>[9]</sup>, 本文取增水水深为 6 m, 则在 50 年一遇波浪情况下的波浪参数为: 波高  $H_{1/10} = 4.3$  m, 波长  $L = 64.0$  m, 周期  $T = 8.6$  s。

按照公式(2)计算波浪在海床土体 0~90 cm 深度内产生的循环应力比, 约为 0.172~0.187, 相差较小, 取其均值 0.18; 按照公式(6)计算土体的循环阻抗比, 当土体强度为 350 N 时, 循环阻抗比约为 0.18, 故当土体强度大于 350 N 时, 其循环阻抗比超过 50 年一遇波浪荷载引起的循环应力比, 土体不会发生液化破坏。4 个研究区的液化破坏状况如图 3 所示。

50 年一遇波浪条件下液化破坏深度均超过 90 cm, 大王北和刁口地区强度较高, 液化范围较小; 而新滩和广利港强度相对较低, 90 cm 深度内土体大部分产生液化破坏。土体液化过程中, 在水动力作用下发生侵蚀、悬浮, 被带到更深的水深处, 未液化的土体仍保留在原地, 形成凹凸不平的灾害现象。应该指出的是, 某些凸起的地层易受到水平向的水动力作用, 进一步发生剪切破坏, 故经波浪作用后的地貌应比图 3 中所示的更加平缓。

图 4 为黄河口潮滩现场调查到的灾害现象, 从图中可以看出, 地貌凹凸不平, 散布众多小型凹坑, 通常小于 30 cm, 直径从几厘米到十几米不等, 小型凹坑可连成片, 成为大面积的低地势区。凹部区域土体强度较低, 在波浪作用下发生液化-侵蚀-悬浮-

运移一系列过程, 残留体强度相对较高, 波浪作用下不易发生液化破坏, 而残留在原地, 而最终形成图中所示的凹凸不平的灾害现象。比较图 3 与图 4, 可以看出两者具有一定的相似性, 可见采用本文计算方法可以定量解释黄河口浅滩灾害的形成。



图 4 黄河口浅滩发育的灾害现象(据文献[10])  
Fig. 4 Disasters observed at the shallow delta of Yellow River(after reference[10])

## 5 结论

(1) 黄河口浅滩地区土体含水量为 20%~30%, 压缩性中等, 处于超固结状态, 且超固结比随深度增加而减小, 刁口地区的超固结比明显大于新滩地区;

(2) 浅滩地区沉积物强度在空间上表现出较强的非均匀性, 并且大王北和刁口地区的略大于新滩和广利港地区, 究其原因是由于水动力作用差异引起的;

(3) 沉积物液化破坏计算表明, 在 50 年一遇波浪条件下, 液化破坏深度超过 90 cm。沉积物强度在空间上的非均匀性导致液化破坏后形成凹凸不平的灾害现象, 计算得到的结果与实测结果具有一定的相似性, 表明灾害形成过程可以采用文中的调查方法和计算方法进行研究。

## 参考文献(References)

- [1] 许国辉, 尹晓慧, 王秀海, 等. 浅表土体强度对黄河水下三角洲微地貌形成的控制作用[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 657-662. [XU Guohui, YIN Xiaohui, WANG Xiuhai, et al. Control action of non-uniformity of surficial stratum on the development of micro-geomorphology of the sub-aqueous Yellow River delta[J]. Journal of Ocean University of China, 2007, 37(4): 657-662.]

- [2] 李广雪,庄克琳,姜玉池. 黄河三角洲沉积体的工程不稳定性[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(6): 21-26. [LI Guangxue, ZHUANG Kelin, JIANG Yuchi. Engineering instability of the deposition bodies in the Yellow River delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(6): 21-26.]
- [3] Prior D B, Suhayda J N, Lu N Z, et al. Storm wave reactivation of a submarine landslide[J]. Nature, 1989, 341(7): 47-50.
- [4] 周其健,贾永刚,马德翠,等. 黄河口潮滩粉土体固结非均匀性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1147-1152. [ZHOU Qijian, JIA Yonggang, MA Decui, et al. Research of consolidating heterogeneity of silt seabed in Yellow River estuary shore[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1147-1152.]
- [5] 成国栋,薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-147. [CHENG Guodong, XUE Chunting. Sedimentary Geology of the Yellow River Delta [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-147.]
- [6] 贾永刚,霍素霞,许国辉,等. 黄河水下三角洲沉积物强度变化原位测试研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 876-881. [JIA Yonggang, HUO Suxia, XU Guohui, et al. Intensity variation of sediments due to wave loading on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 876-881.]
- [7] 常方强,贾永刚,孟祥梅,等. 波浪引起埕岛海域不同区域土体的液化程度[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2): 37-43. [CHANG Fangqiang, JIA Yonggang, MENG Xiangmei, et al. The degree of liquefaction of seabed induced by storm wave in Chengdao Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(2): 37-43.]
- [8] Nataraja M S, Gill H S. Ocean wave-induced liquefaction analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, Proceedings, ASCE, 1983, 109(GT4): 573-590.
- [9] 林祥,尹宝树,侯一筠,等. 辐射应力在黄河三角洲近岸波浪和潮汐风暴潮相互作用中的影响[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 615-621. [LIN Xiang, YIN Shubao, HOU Yijun, et al. Effects of radiation stress in the interaction of coupled wave tide surge in the coastal area of Huanghe delta[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 615-621.]
- [10] Li Pengying. Tidal flat landforms and their scouring-silting changes in the central part of the modern Huanghe River Delta[C]//Contribution to 30<sup>th</sup> International Geological Congress. Beijing, 1996: 75-88.

## DISASTERS CAUSED BY WAVE-INDUCED SEDIMENT LIQUEFACTION AT THE YELLOW RIVER DELTA, CHINA

CHANG Fangqiang<sup>1,2</sup>, JIA Yonggang<sup>2</sup>

(1 College of Civil Engineering, Hua Qiao University, Xiamen, 361021;

2 GeoEnvironmental Engineering Group, Faculty of Environmental Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266110)

**Abstract:** Four areas of different age at the shallow shoal of Yellow River delta were chosen for this study. Some physical and mechanical parameters of sediments were measured indoor, and the strength of sediments at one meter in depth in two dimensions was measured by Proctor Penetrometer in-Situ. Then, a model of soil liquefaction failure was established to calculate the sediment failure under a wave case of 50 years. The calculated geomorphology was compared with the investigated in-Situ. The study reveals that (1) the sediment at the shallow delta is over consolidated, and the over consolidation ratios (OCR) decrease with depth. (2) the sediment strength is very non-uniform, and the strength at Da Wang Bei and Diao Kou is higher than that of Xin Tan, Guang Li port. (3) the sediment liquefaction depth could be beyond 90cm under a wave case of 50 years, and the non-uniformity of sediment strength will cause disasters after liquefaction failure. The landscape established by calculation is similar to the real. The methods of testing and quantitative analysis used by the authors could be extended to the further study of the disasters caused by wave-induced sediment liquefaction.

**Key words:** shallow delta; disaster; liquefaction; the Yellow River delta