

DOI:10.3724/SP.J.1140.2010.05145

黄河水下三角洲液化引起的灾害研究现状

常方强^{1,2}, 贾永刚²

(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 266100)

摘要:对 20 世纪 80 年代以来有关黄河水下三角洲液化引起的灾害调查实例成果和诱发因素进行了简要汇总, 认为该区这些灾害成因之一是液化破坏所致; 然后, 重点对近期液化破坏的两种研究方法(试验测试和数值计算)及其成果进行了综述, 同时, 分析了研究中存在的问题; 最后探讨今后可进一步研究的内容, 建立该区基本土性区域概况、测试波浪作用下土体的液化过程及建立液化引起的灾害发生过程及运移结果预测体系, 是今后需要研究的核心内容。

关键词: 波浪; 液化; 灾害; 黄河水下三角洲

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2010)05-0145-07

黄河三角洲是由黄河高浓度泥沙快速堆积在河口地区形成的, 来自黄河的泥沙 90% 沉积在河口 20 km 以内^[1], 形成复杂的鸟嘴状体系。该区富含油气资源, 是胜利油田重要产油区之一, 众多石油工程设施(如海底管道和石油平台等)遍布, 同时, 该区土体往往处于欠固结状态、强度较低、黏聚力较小, 在春冬两季强风浪影响下, 巨大波浪循环荷载作用在土体上, 土体产生液化, 引发多种地质灾害^[2], 给石油设施造成极大威胁。

本文旨在总结论述波浪荷载作用下黄河水下三角洲液化破坏及其引起的灾害类型和几何特征, 以及在该区开展的与液化破坏有关的理论研究, 最后探讨存在的问题及可进一步开展的研究工作。

1 灾害类型及分布

1985—1987 年中美加的联合调查研究及 90 年代以来若干科研单位和胜利油田等单位为石油开发在该区进行的地质勘察资料显示, 黄河水下三角洲存在大量地质灾害, 包括凹坑、冲沟、滑塌、泥流舌、海底穿刺、粗糙海底和埋藏古河道等。文献[3]指出黄河口埕岛海域是世界上海洋工程环境最复杂的区域之一。通过对先前学者在该区域的地质勘察资料的浅地层、旁扫声纳和测深的统计分析, 发现黄河水

下三角洲存在大量液化引起的灾害, 并可分为以下几类:

1.1 凹坑与洼地

在水深 6~15 m 的深度内, 发现存在凹坑和洼地, 凹坑深度约为 0.3~1.5 m, 较深的达 2 m。某些凹坑底部残留着块状沉积物, 凹坑大都呈圆形或者椭圆形, 直径从几十米到上百米不等。有的凹坑因周围海流冲刷作用呈梯形, 如在埕岛油田 CB11H 井场东北方向约 90 m 处发现一凹坑东宽西窄, 东部宽度 120 m, 西部宽度仅有 25 m, 东西向长约 200 m。关于凹坑形成原因, 主要有三:(1)原凹坑处沉积土体强度较低, 极端海况下, 波浪和海流等的作用使其侵蚀, 进而悬浮运移, 原位形成凹坑;(2)原凹坑处沉积土体在波浪作用下产生液化, 在海流作用下冲刷形成。凹坑侧壁坡度较大时, 在波浪作用下易发生坍塌, 塌块落到凹坑底部。(3)波浪作用下, 土体液化产生“喷沙冒水”, 黏性小的细小土颗粒容易被孔隙水流带到地面, 进而被波浪或者海流冲刷。如果液化一直持续, 土颗粒可能源源不断地被带到地面, 海床形成空洞, 容易出现坍塌形成凹坑。“喷沙冒水”现象在现场海床振动试验中得到证实, 如图 1 所示, 振动过程中, 不断出现类似“泥火山”的颗粒堆积物。

1.2 冲沟

黄河水下三角洲不稳定区域存在冲沟, 冲沟宽度可达数百米, 有的冲沟延伸数千米, 深度可达 2~3 m^[5]。最大的冲沟出现在东北部, 每条主冲沟的上坡端呈一组狭窄弧形湾槽, 有时充填以扰动的巨

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

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:2009-11-13;改回日期:2010-04-09. 文凤英编辑

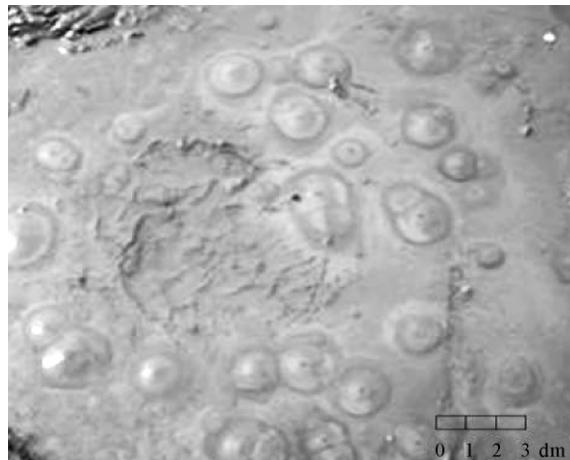


图 1 振动过程中土体液化出现的“喷沙冒水”现象^[4]

Fig. 1 “Sand boils” phenomenon caused by soil liquefaction during vibrating experiment (According to Ref. [4])

大块体^[6]。斜坡液化可引起滑坡,滑坡切蚀海底可形成冲沟。文献[7]指出滑坡过程中,从源区流出的高浓度沉积物顺坡流动,切蚀海底形成冲沟^[7]。

1.3 滑坡

若干液化引起的灾害中,滑坡是对海洋工程设施危害最大的一种,其滑移过程中可能工程设施产生水平推力。对于滑坡规模,其长度通常为几百米,深度可达 1~3 m^[7],属浅表层滑坡。对于其形成机制,一般认为三角洲内的快速沉积作用形成的低强度沉积物在海面风暴波浪作用下,产生巨大的超孔隙水压力后液化所致^[8-9];且这种不稳定状态与风暴潮有关,风暴潮导致海底斜坡“复活”,这种“复活”重复发生,且发生的位置和范围几乎不变。文献[7]通过对黄河水下三角洲野外考察和深入研究,发现该区存在大规模的滑坡体系,并分为三类:瓶颈式滑坡、平移板状滑坡和旋转滑坡。

黄河口海底斜坡的坡度极小,重力促发滑坡的作用较小,滑坡的产生主要与风暴期间的土体液化密切相关,土体液化过程中,强度降低,沿着斜坡滑出,形成泥流舌。

1.4 海底刺穿

通过对地形、高分辨率浅地层剖面及钻孔等资料分析,已发现黄河水下三角洲北部存在海底刺穿^[10]。刺穿的形成与海底侵蚀密切相关,刺穿发生在侵蚀量最大部位。海底刺穿的形成也与海床土体液化有关,当软弱层液化后,被挤压形成向上的流动进而形成刺穿。本人认为还可能是由于土体水平向

上强度具有非均匀性,强度较低的土体易液化侵蚀,而强度高的保留在原地,形成所谓的海底刺穿。

1.5 粗糙海底

凹坑、冲沟、滑坡和残留体等存在的区域称为粗糙海底,严格来讲不是一种灾害类型。其面积占整个测区的 10%~50%,个别地区高达 70%。埕岛残留体为侵蚀所致,边缘较陡,与周围平坦海底相差 0.2~0.3 m。残留体反射声波强烈,表明该类物质较硬。粗糙海底的形成与土体强度在水平向上的不均匀性有关,土体强度高的土体不易液化侵蚀而留在原地,相反强度较低的土体容易发生侵蚀,造成了海底的凹凸不平。

1.6 埋藏沟谷

埋藏沟谷,包括埋藏冲沟、古河道和潮沟,横剖面一般呈“V”字形或“U”字形,宽度几十米到数百米,深度几米到十几米。上覆沉积物厚度不等,具有松散、含水量高、高压缩性和低强度的特点。沉积物的土性和厚度在水平方向上变化迅速,与下伏基面组成软硬各异、厚薄不均的地基,可能引起不均匀沉降^[11]。

根据以上调查到的若干灾害标在埕岛海域平面图上(图 2),可以看出,在海域的西北、中部和东南地区均有灾害发育。

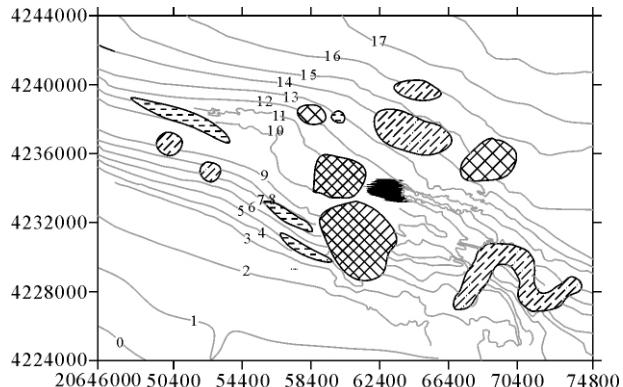


图 2 埕岛海域若干液化引起的灾害类型及其分布区域

Fig. 2 The types and distribution of geological disasters in Chengdao sea area

2 灾害诱发因素

黄河水下三角洲液化引起的灾害形成与多种因素有关,大致可以分为两类:一是土质因素,二是荷

载因素。

2.1 土质因素

黄河水下三角洲沉积物以细粒土为主, 表层沉积物中粉质土占 90% 以上^[12], 土体以粉土、粉质黏土和粉砂为主^[13-14]。该区土体的某些性质与灾害成因直接有关:(1)高含水量, 黄河水下三角洲 2 m 以浅沉积物含水量高达 50%~70%^[1], 土体的含水量与黏粒含量有关, 黏粒含量高者含水量也高, 较高的含水量减弱了土颗粒的胶结程度和压密作用。(2)欠固结, 由于该区沉积物是由黄河携带的泥沙快速堆积形成的, 土体往往处于欠固结状态, 含有一定的超孔压。(3)低强度, 水下三角洲表层覆盖着大量海底浮泥, 几乎没有抗剪强度。沿三角洲向外, 由于沉积速率降低, 沉积物抗剪强度逐渐升高^[3]。该区表层土体抗剪强度较低, 仅为 3~4 kPa^[1]。(4)软弱层, 黄河水下三角洲软弱层的存在对灾害的形成有重要影响, 为海底刺穿和海底滑坡的产生创造了条件^[10,15]。(5)坡度, 水下三角洲具有较小的坡度, 一般小于 0.6°, 当土体强度小于某一值时, 仍可能沿着某一面产生滑动迁移。(6)浅层甲烷气, 前三角洲和分流间湾(即黄河口两侧的烂泥湾)沉积环境中形成的软弱层中, 常常形成一些甲烷气体, 这些气体能够造成软弱层和上覆沉积物的剪切强度大大降低, 同时, 还造成软弱层内部超高压, 加剧三角洲沉积体的不稳定性^[15]。

2.2 荷载因素

三角洲沉积过程中形成的土质因素为不稳定性因素创造了条件, 在外部荷载触发机制下, 可产生灾害。外部荷载因素主要有:(1)波浪荷载, 波浪是三角洲最为常见的荷载, 主要控制液化引起灾害的形成。在春冬两季, 西北强风可引起较大的波高, 该区曾观测到高达 7 m 的波高^[6], 较大的波浪荷载加上低强度的土体, 引发灾害。波浪荷载引发土体液化, 强度降低, 进一步形成灾害, 已形成共识^[2-10]。(2)地震荷载, 黄河三角洲位于郯庐地震带内, 历史上曾发生的 12 次强烈地震对三角洲均造成了较大破坏。地震荷载同样使得土体产生液化, 引发灾害。

3 灾害成因研究方法

近 20 年来, 多个国家和单位对黄河水下三角洲灾害已进行了大量调查, 但采用试验与理论揭示灾害成因的研究主要集中于 90 年代以来, 并主要在国

内科研院所及高校。目前对于该区液化引起的灾害成因研究方法可分为试验测试和理论计算两大类, 其中试验测试包括动三轴试验、水槽试验、现场振动试验和现场原位观测。

3.1 试验测试

3.1.1 动三轴试验

动三轴的应力状态是波浪荷载的简化形式, 波浪传播过程中, 在海床内引起的主应力方向不断旋转, 而动三轴试验不能实现。

动三轴试验中最重要的测试参数之一是孔压变化, 黄河水下三角洲粉土在不同动应力作用下, 孔压变化过程在开始阶段相似, 即加载的一瞬间, 孔压马上上升至一定高度, 其后变化过程差异性较大^[16-18], 并且动应力较小者, 孔压累积缓慢, 增幅由大变小, 曲线较平缓, 直至振动循环次数接近破坏振次; 动应力较大者, 孔压累积很快, 孔压幅值变化不大, 曲线较陡, 可采用双曲线作为孔压变化的模型曲线^[18], 围压与固结比对孔隙水压力的发展模式影响很小^[19]。

黄河口细粒土在动三轴循环荷载作用下, 往往因轴向应变过大而出现液化破坏, 已有研究者测试了液化破坏开始时的孔压比。当粉土、粉质黏土的孔压比超过 0.68 时, 液化开始, 土样变形明显增大; 对于粉砂, 孔压比超过 0.87 时变形才明显增大, 因此粉土和粉质黏土孔压比 0.68、粉砂孔压比 0.87 可作为液化破坏开始的标志^[17-18]。

在黄河口细粒土中, 粉质黏土的抗液化强度最大, 粉砂最小, 粉土介于中间^[17]。这是因为粉质黏土具有较高的黏粒含量, 黏粒增加了颗粒之间的结构强度, 具有较高的抗液化强度, 而粉砂颗粒之间结构强度最小。

黄河口粉土的动剪切模量和阻尼比, 也有学者进行了测试, 发现海底浅层粉土的最大动剪切模量为 19.45 MPa, 最大阻尼比为 0.22, 比砂土的小得多^[16]。此外, 围压不同, 测得的最大剪切模量也不同, 粉土在不同围压(50、100、150 kPa)下的最大动剪切模量分别为 19.46、31.15、53.64 MPa, 最大阻尼比为 0.335, 平均值为 0.123^[19]。粉粒含量对动剪切模量影响较大, 围压对归一化剪切模量和阻尼比的影响也较为显著^[17]。

循环荷载作用下, 粉土动强度比静强度小。黄河口粉土动强度仅为静强度的 0.35 倍左右^[16]。粉土动强度比固结不排水静三轴试验测得的静强度也低许多^[19]。这主要是因为动荷载在粉土中产生超

孔压,而使有效应力减小,导致强度降低。

3.1.2 水槽试验

水槽试验动力条件与实际波浪传播过程中的较为接近,利用造波机产生所需要的波浪要素,波浪传播过程中作用于铺设在水槽底部所研究的土体上。在土体内埋设孔隙水压力探头,同时监测波浪传播过程中波高和周期,以及土体内孔隙水压力变化,研究波浪作用下土体孔压动态响应。

水槽试验揭示黄河水下三角洲土体在波浪循环荷载作用下,粉土和粉质黏土存在一破坏循环极限荷载,在小于此极限循环荷载作用下,土体中孔压总体呈下降趋势,没有累积升高的过程,这种变化过程与砂土的不同^[20]。波浪荷载的持续作用使得水槽底部的土体出现来回振荡,并逐渐形成凹坑,由此可以推断现场调查中发现的凹坑形成过程^[21]。

3.1.3 现场振动试验

振动试验是利用重锤自由落体锤击铺设在海床土体上的荷载板模拟波浪荷载,在土体内埋设孔压探头和检波器探头等监测土体的动力响应。现场振动试验可直接在原状土上施加动荷载,土体未经扰动。

现场振动试验主要测试振动过程中,利用原位测试某一深度内土体强度和孔压变化过程,以及土体对振动能量的吸收等。此外,也可取土样测试土体物理力学性质的变化量。

在现场振动试验中,土体强度随着振动荷载的持续而降低,并且发生在一定海床深度内^[4,22-23],强度丧失量和恢复量沿深度呈抛物线形变化。振动后土体表层形成“泥火山”,振动结束24 h后,土体强度超过振前原状土强度^[4,22]。黄河口发育的硬壳层,在振动循环荷载作用下,孔压逐渐升高,土体强度逐渐降低,振动结束静置一段时间后,其强度能够逐渐恢复。振动同时导致土体强度参数和物理参数发生变化,并且深度不同,变化程度也不同^[22-23]。

3.1.4 现场原位监测

原位测试是在风暴潮来临之前,事先在海床土体内埋设相关仪器,如孔压探头和测斜仪等,监测风暴潮期间土体的动力响应特征,数据自动记录保存或传输,然而原位测试难度较大,目前研究者仍较少。

在液化引起的灾害原位监测中,最为成功的一次是Prior等在1989年观测到风暴潮期间海底土体发生滑坡的过程^[9]。其后,也有学者观测正常海况下黄河口海床土体孔压随波浪变化情况^[24]。黄河水下三角洲某些原来的滑坡会发生“复活”现象,

且发生的位置几乎不变,粉砂流滑坡的复活是扰动和沉积物强度降低引起的^[9]。在正常海况下黄河水下三角洲土体内的超孔压,随深度分布不均匀,存在极值,最大值出现在2.3~4.0 m深度内,向下逐渐衰减。

3.2 数值计算

通过理论计算黄河水下三角洲土体的液化破坏状态,较为简便,费用也低。目前理论研究成果主要有以下几点:

数值计算波浪作用下液化及其引起的灾害,分析方法有三:一是基于有效应力原理^[25],当土体超孔压达到有效上覆应力时,土体出现完全液化,强度丧失,进而出现灾害现象;二是基于抗剪强度理论^[26-27],当外界循环荷载引起的剪应力超过了土体强度时,土体将发生剪切破坏,破坏过程中循环荷载引起的超孔压削弱了土体的有效强度,加剧了灾害的形成;三是基于简易经验法^[28],计算土体抗液化安全系数,当波浪引起的循环应力比(CSR)超过了土体本身的循环阻抗比(CRR),土体出现液化,否则未液化。

波浪在海床内引起的孔压计算,需同时考虑孔压随时间的消散和累积过程,理论计算表明黄河水下三角洲海床在50年重现期波浪作用下,4~6 m以浅的软土有滑动的可能性^[25]。剪切破坏的计算,可以采用geo-slope软件进行分析,波浪引起的孔压对土体强度的衰减基于有效应力原理^[27]。极端海况下,黄河口埕岛海域东南部和北部土体性质较差,发生液化破坏的可能性较大,而西南地区土体强度相对较高,水深较浅,不易发生液化,是该海域相对稳定的区域^[28]。

4 目前亟待深入研究的问题

虽然在黄河水下三角洲液化引起的灾害成因与过程方面已进行了一些研究,取得了一些结论,但仍存在许多问题,有待进一步深入研究,具体包括以下3个方面。

4.1 三角洲基本土性环境及特征

(1) 土性的空间分布特征

基本土性特征是研究灾害成因的基础。河口三角洲受河流和海洋水动力的联合作用,其沉积固结过程十分复杂,土性在空间上表现出较强的非均匀性^[29]。建立这种整体趋势,需要大量地质勘察资

料,目前该区虽已进行了大量工程勘察,但这些资料大都分散在各个单位,有待进一步搜集汇总各勘察资料初步建立该区完善的土性区域结构,包括不同深度处土体名称、土体物理力学性质沿整个区域的分布特征,以及土性的空间分布特征。

(2) 土体性质随固结时间的变化过程

新近沉积的土体往往处于欠固结状态,随着时间的持续固结程度逐渐增大,在遇极端海况时,强度又有丧失过程,而后又逐渐固结增长,这一系列变化过程,仍需进一步研究。

(3) 土性参数的变异性

由于土性参数的变异性(包括空间变异性)和时间变异性),在选取参数计算时,需要考虑到这种变异性对结果可靠性的影响。有待进一步汇总各单位的土性数据,分析土性的分布特征与概率特性。

4.2 波浪荷载作用下土体液化过程

(1) 建立完善的土体动力响应参数

黄河口土体种类较多,黏粒含量差异较大,导致液化过程中表现出的行为特征差异性也较大。利用动三轴试验测试不同黏粒含量下的土体动力响应参数,包括孔压响应、变形过程、破坏标准参数和动强度等。土体种类不同,动力响应过程可能也不同,建立不同种类土体的动力响应参数。

(2) 研究更接近实际情况的模拟试验环境

水槽试验中,采用的土体其强度一般较低,处于欠固结状态,如何制备接近实际海床固结程度的土体,有待进一步研究;振动试验过程中,采用的振动荷载与实际波浪循环荷载差异性较大,前者循环荷载为锤击力,作用介质为荷载板,而波浪荷载接近简谐荷载,作用介质为海水,振动力的测试也需要进一步研究。

(3) 将黄河口土体动力参数应用到数值计算模型中

目前数值计算参数不少采用沙土模型中的,将黄河口土体动力参数,包括孔压模型、液化破坏标准应用到理论模型中,更加符合实际场地情况。此外,目前的计算尚未结合实际波浪作用持续时间和作用频率,因此有必要结合一段时期(如一年或几年)内的具体海况特征,计算液化过程。

4.3 灾害过程预测

(1) 灾害形成规模和位置

目前的研究状况,仍不能定量计算黄河水下三角洲液化破坏后形成的独特地貌,如凹坑、滑坡、海

底刺穿和粗糙海底的产生,不能解释为什么此处存在灾害,其他处不存在。因此,具体结合建立的土性空间分布特征,理论计算灾害形成规模和位置,是今后研究的方向之一。

(2) 灾害演化过程

土体破坏后结果如何,例如土体液化后滑移速度和滑移距离等,最终呈现何种状态,也不清楚。建立理论模型预测灾害演化过程,对于预测和避免灾害具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] Keller G H, Yincan Y. Geotechnical properties of surface and near-surface deposits in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1-2): 159-174.
- [2] 李海东,杨作升,王厚杰,等.现代黄河水下三角洲地质灾害现象的空间分布[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(4):37-43. [LI Haidong, YANG Zuosheng, WANG Houjie, et al. Factors of geo-hazards in the modern Yellow River subaqueous delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26 (4):37-43.]
- [3] 张卫明,梁瑞才,牟晓东,等.埕岛油田海域海底沉积特征与工程地质特性[J].海洋科学进展,2005, 23 (3): 305-312. [ZHANG weiming, LIANG Ruicai, MOU Xiaodong, et al. Sea bottom sediment characteristics and engineering geologic properties in the Chengdao oil field sea are[J]. Advances in Marine Science, 2005,23(3):305-312.]
- [4] 贾永刚,史文君,单红仙,等.黄河口粉土强度丧失与恢复过程现场振动试验研究[J].岩土力学,2006, 26(3):351-358. [JIA Yonggang, SHI Wenjun, SHAN Hongxian, et al. In-situ test study on silt strength's loss and recovery due to vibration load in the Yellow River mouth[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,26(3):351-358.]
- [5] 陈卫民,杨作升,Prior D B,等.老黄河口水下底坡不稳定性研究[C]//黄河口水下底坡不稳定性.青岛:青岛海洋大学出版社,1991:43-56. [CHEN Weimin, YANG Zuosheng, Prior D B, et al. Studies on submarine slope instability of abandoned Yellow River mouth[C]//Submarine Slope Instability of the Yellow River Mouth. Qingdao: Qingdao Ocean University Press,1991:43-56.]
- [6] Prior D B. 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.
- [7] 杨作升,陈卫民,陈彰榕,等.黄河口水下滑坡体系[J].海洋与湖沼,1994, 25 (6): 573-581. [YANG Zuosheng, CHEN Weimin, CHEN Zhangrong, et al. Subaqueous landslide system in the Huanghe River (Yellow River) Delta[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1994,25(6):573-581.]
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 李广雪, 刘守全, 姜玉池, 等. 黄河三角洲北部海底刺穿初步研究[J]. *中国科学 D 辑*, 1999, 29(4): 379-384. [LI Guangxue, LIU Shouquan, JIANG Yuchi, et al. the preliminary study of diapiric structures in north of sub-aqueous of Yellow River [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(4): 379-384.]
- [11] 周良勇, 刘健, 刘锡清, 等. 现代黄河三角洲滨浅海区的灾害地质[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(3): 19-27. [ZHOU Liangyong, LIU Jian, LIU Xiqing, et al. Coastal and marine geo-hazards in the modern Yellow River delta[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 19-27.]
- [12] 成国栋, 薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 地质出版社, 1997: 36-50. [CHENG Guodong, XUE Chunting. *Sedimentary Geology of Yellow River Delta*[M]. Geology Press, 1997: 36-50.]
- [13] 冯秀丽, 杨荣民, 沈渭铨, 等. 现代黄河三角洲东北部(埕北地区)晚更新世及全新世地层的物理力学性质[J]. *海洋湖沼通报*, 1990, 3: 23-29. [FENG Xiuli, YANG Rongmin, SHEN Weiquan, et al. Physical and mechanical properties of late Pleistocene and Holocene strata in the northeast offshore area of the Huang he delta[J]. *Transactions of Oceanology and limnology*, 1990, 3: 23-29.]
- [14] 冯秀丽, 林霖, 庄振业, 等. 现代黄河水下三角洲全新世以来土层岩土工程参数与沉积环境之间的关系[J]. *海岸工程*, 1999, 18(4): 1-7. [FENG Xiuli, LIN Lin, ZHUANG Zhenye, et al. The relationship between geotechnical parameters and sedimentary environment of soil layers since Holocene in modern Huang he subaqueous delta[J]. *Coastal Engineering*, 1999, 18(4): 1-7.]
- [15] 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(2): 21-26. [LI GuangXun, ZHUANG Kelin, JIANG Yuchi. Engineering instability of the deposition bodies in the Yellow River delta[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 21-26.]
- [16] 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*, 2002, 32(3): 431-435. [FENG Xiuli, YE Yincan, MA Yanxia, et al. Silt pore pressure response and dynamic strength under dynamic loading [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(3): 431-435.]
- [17] 马德翠. 黄河口粉质土体的动力响应特性及机理研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2005: 24-35. [MA Decui. Research on dynamic response to vibratory loads of silty soils and the physical mechanics in the Yellow River estuary[D]. Thesis of Ocean University of China, 2005: 24-35.]
- [18] 刘红军, 王小花, 贾永刚, 等. 黄河三角洲饱和粉土液化特性及孔压模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(增 2): 93-97. [LIU Hongjun, WANG Xiaohua, JIA Yonggang, et al. Experimental study on liquefaction properties and pore-water pressure model of saturated silt in Yellow River delta[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(supp. 2): 93-97.]
- [19] 曹成效, 刘乐军, 李培英, 等. 循环荷载作用下粉土的动力学特性[J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(1): 54-62. [CAO Chengxiao, LIU Lejun, LI Peiyng, et al. Dynamic characteristic of silty soil under cyclic loadings[J]. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(1): 54-62.]
- [20] 许国辉, 单红仙, 贾永刚. 黄河水下三角洲沉积物在循环荷载作用下土体中孔压变化实验研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(1): 80-86. [XU Guohui, SHAN Hongxian, JIA Yonggang. Experiment research on the variation of pore pressure under cyclic loading in the subaqueous Yellow River delta[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(1): 80-86.]
- [21] 许国辉, 贾永刚, 郑建国, 等. 黄河水下三角洲塌陷凹坑构造形成的水槽试验研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(3): 37-40. [XU Guohui, JIA Yonggang, ZHENG Jianguo, et al. Flume test formed by collapse in the Yellow River subaqueous delta[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 37-40.]
- [22] 单红仙, 段兆臣, 刘正银, 等. 粉质土重复振动液化与效果研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(1): 75-81. [SHAN Hongxian, DUAN Zhaochen, LIU Zhengyin, et al. Repeated liquefaction and the effect on properties of silt[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 37(1): 75-81.]
- [23] 张珂, 刘正银, 单红仙, 等. 黄河三角洲细粒土微振液化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增 1): 3144-3151. [ZHANG Ke, LIU Zhengyin, SHAN Hongxian, et al. Microshock liquefaction analysis of fine grained soil in Yellow River delta[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(supp. 1): 3144-3151.]
- [24] 刘涛, 冯秀丽, 林霖. 海底孔压对波浪响应试验研究及数值模拟[J]. *海洋学报*, 2006, 28(3): 173-176. [LIU Tao, FENG Xiuli, LIN Lin. Study of seabed pore water pressure based on in-situ test and numerical simulation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(3): 173-176.]
- [25] 杨少丽, 沈渭铨, 杨作升, 等. 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. [YANG Shaoli, SHEN Weiquan, YANG Zuosheng, et al. The mechanism analysis of seafloor silt liquefaction under wave loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(4): 28-37.]
- [26] 刘红军, 张民生, 贾永刚, 等. 波浪导致的海床边坡稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(6): 986-990. [LIU Hongjun, ZHANG Minsheng, JIA Yonggang, et al. Analysis of seabed stability under wave loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 986-990.]
- [27] 孙永福, 董立峰, 蒲高军, 等. 风暴潮作用下黄河水下三角洲斜坡稳定性研究[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(5): 582-587. [SUN Yongfu, DONG Lifeng, PU Gaojun, et al. Stability analysis of slopes in the subaqueous delta of the Yellow River under storm wave loading[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(5): 582-587.]
- [28] 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.]
- [29] 常方强,贾永刚,常方伟.波浪作用下黄河口埕岛海域海床非均匀液化研究[J].华东师范大学学报:自然科学版,2009,3:83-89.[CHANG Fangqiang, JIA Yonggang, CHANG Fangwei. Study on seabed non-uniformity liquefaction under wave forces at Chengdao Sea of Yellow River estuary, China[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2009,3:83-89.]

REVIEW OF THE STUDIES ON GEO-HAZARDS INDUCED BY LIQUEFACTION AT THE YELLOW RIVER SUBAQUEOUS DELTA

CHANG Fangqiang^{1,2}, JIA Yonggang²

(1 Faculty of Civil Engineering, Hua Qiao University, Quanzhou, 362021;

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

Abstract: Some liquefaction failure examples and their forming mechanisms extracted from survey results at the Yellow River delta since 1980s were briefly summarized and reviewed. It suggests that soil liquefaction is one of the main cause of geohazards in the estuarine area. Achievements of field testing and theoretical studies are also presented in this paper. There are problems remained unsolved. Based upon the findings, suggestions and recommendations are proposed for further consideration, such as, understanding more about the basic regional soil property distribution, testing soil liquefaction process, and establishment of forecasting systems etc.

Key words: wave; liquefaction; geological disaster; review