

黄河水下三角洲硬壳层特征及其液化过程研究^{*}

常方强^① 贾永刚^① 张 建^② 张衍涛^② 单红仙^①

(^①中国海洋大学环境科学与工程学院岩土环境工程组 青岛 266110)

(^②胜利工程设计咨询有限公司 东营 257000)

摘 要 为揭示黄河口水下三角洲硬壳层的土性特征和风浪作用下的液化破坏状况,选择典型研究区,在现场利用普氏贯入仪测试硬壳层的强度特征,原位取 1m 原状样进行室内土工试验;利用重锤锤击荷载板的方式模拟波浪对硬壳层的动力作用,通过孔压探头和普氏贯入仪实时监测土体内孔压和振动前后强度的变化;通过理论计算研究硬壳层在不同风浪等级下的液化深度。通过研究发现,(1)硬壳层土体基本上处于超固结状态,且超固结比随深度增加而减小,大王北和刁口地区硬壳层强度约是新滩和广利港的两倍,离河口近的地区强度的变异系数比远的地区要大;(2)根据孔压随振次的变化关系,现场土体在振动过程中,孔压的增长经历了 4 个阶段,即初始阶段、增长阶段、稳定阶段和衰减阶段,且表层土体达到液化,深层的未液化;(3)大王北硬壳层在 6~10 级风浪下的平均液化深度仅为 7~11cm,新滩和广利港硬壳层在 6~10 级风浪作用下的液化深度达 32~42cm。强度高的硬壳层液化深度小,低的液化深度大,这种液化深度的差异性造成了地貌上的凹凸不平。

关键词 黄河水下三角洲 强度 振动 液化 风浪

中图分类号:P642 文献标识码:A

SOIL PROPERTY AND LIQUEFACTION PROCESS OF HARD SHELL SEAMS AT SUBAQUEOUS DELTA OF YELLOW RIVER

CHANG Fangqiang^① JIA Yonggang^① ZHANG Jian^② ZHANG Yantao^② SHAN Hongxian^①

(^①GeoEnvironmental Engineering Group, Faculty of Environmental Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266110)

(^②Shengli Engineering & Constructing Co., Ltd, Dongying 257000)

Abstract This paper examines the soil characteristic and liquefaction degree of hard shell seams at the subaqueous delta of the Yellow River. Four typical areas were chosen for measuring, testing and studying. The hard shell seam strength was measured by in-situ Proctor penetrometer. Undisturbed soil sample of 1 m long was excavated for laboratory soil property test. Sledge hammers were dropped down freely to hit the load board to simulate the wave force acted on the hard shell seam. The excess pore pressure and strength variation were observed. The liquefaction depth of the hard shell seams at four study areas under different wave storms were calculated by theory. From the studies, some conclusions were gotten: (1) the hard shell seams are in overconsolidated state, and overconsolidation ratio decreases with depth. The strength of the hard shell seams at Dawangbei and Diaokou are twice of those at Xintan and Guangli ports. The strength variation coefficient near the estuary is bigger than those far from estuary. (2) According to the pore pressure variation with vibration times, the pore pressure variation can be divided into four stages, initial stage, growth stage, stabilization stage and attenuation stage. During vibration, the surface soil

* 收稿日期:2008-06-02;收到修改稿日期:2008-07-08.

基金项目:国家自然科学基金(40472137),中石化集团公司重点攻关项目(JP05007).

第一作者简介:常方强,主要从事海洋工程地质环境灾害研究. Email:malcme@126.com

liquefied, however the deeper soil did not liquefy. (3) The liquefaction depth of the hard shell seam at Da Wang Bei is 7 to 11 cm under 6th to 10th storms, and they reach 32 to 42cm at Xin Tan and Guang Li ports. The liquefaction depth of the hard shell seam with high strength was small, however the seam with low strength liquefied deeper, thus the difference of liquefaction depth caused the non-uniformity of seabed.

Key words The subaqueous delta, Yellow River, Soil strength, Vibration, Liquefaction, Storm, Soil consolidation

1 引言

大量工程调查表明世界较大河口,如 Mississippi 河、Ele 河和我国黄河水下三角洲,均发现普遍发育的沉积物硬壳层,俗称“铁板砂”。硬壳层常常作为海洋平台和海底管线等工程设施的持力层,在较大风浪期间的水动力作用下,硬壳层可能遭到破坏,导致建筑物失稳,造成重大经济损失。

关于硬壳层特征及在波浪水动力作用下的动力特性,大都基于定性描述或者将海床视为均质体,采用解析解或数值模拟的方法进行研究,硬壳层的空间强度分布特征和具体结合土性参数分析其液化状况的研究却较为少见。Morgan & Coleman^[1] 通过对 Mississippi 河水下斜坡稳定性的研究,提出了一种原生模式解释硬壳层成因,即快速沉积的、密度大的河口砂坝形成了三角洲上部较硬的土层,前三角洲相的细粒沉积形成了下部较软的土层,软弱层在其上部不均匀荷载的作用下,发生应力调整,软弱层的粘土质沉积物被挤压向上,作为底辟侵入到上覆沉积物中,引起土体强度的非均匀性;贾永刚等^[2] 对黄河水下三角洲硬壳层强度进行原位测试,分析两个区域的空间强度分布特征;周其健等^[3] 从土体固结角度分析硬壳层强度非均匀性产生的原因,认为非均匀性是由于波浪荷载作用下土体固结形成的;杨少丽等^[4] 通过数值模拟的方法研究了黄河水下三角洲在极端海况下土体液化深度;黄河口硬壳层的液化破坏,自 20 世纪 80 年代以来的地质调查中得到证实,发现了破坏后形成的多种类型地质灾害^[5-8]。

黄河入海口在历史上先后经历多次改道,现行河口流经清水沟流路,由于沉积固结历史等原因,不同走河期间形成的水下三角洲硬壳层特征可能不同,在波浪循环荷载作用下的液化状况可能也存在差异。本文通过现场原位测试研究黄河废旧河口和现行河口 4 个典型区域硬壳层的空间强度分布特征;利用人工模拟波浪的加载方式研究硬壳层的液

化状况,分析其液化机理;具体结合硬壳层的强度特征采用数值方法计算硬壳层在不同风浪等级下的液化深度,探讨液化造成的非均匀地貌。

2 研究方案的设计

2.1 研究区的选择

黄河三角洲是黄河携带的大量泥沙快速堆积在河口地区形成的,黄河每年在河口地区沉积的土体达 1.06×10^9 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,大多位于 0 ~ 18m 之间,最深处不超过二十几米。水下斜坡坡度极缓,常小于 0.6° ,距岸 10 余公里的海域,水深只有十几米,退潮时数公里的潮滩露出水面,为试验研究的开展提供便利条件。

分别选取黄河三角洲的一废旧河口(刁口流路)和现行河口(清水沟流路),每个河口选取河口附近和河口较远的两个地区进行研究,即共选择 4 个典型研究区,即大王北、刁口、新滩和广利港(图 1)。

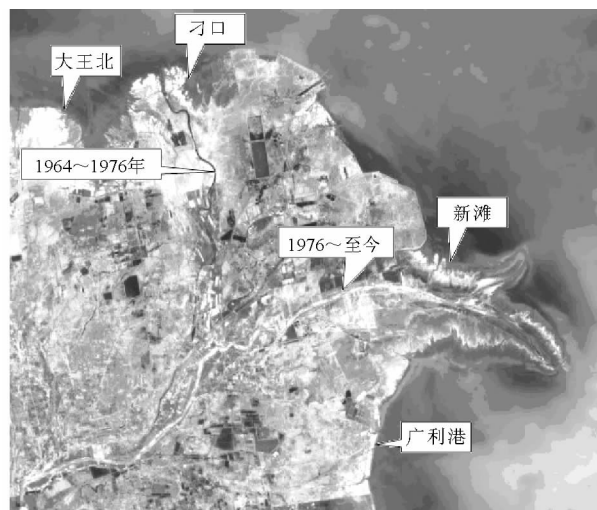


图 1 4 个研究区地理位置示意(由 Google earth 修改)

Fig. 1 The locations of four study areas (modified after Google earth)

2.2 试验方案的设计

试验整个过程包括4个研究区土体物理力学性质测试和模拟波浪荷载作用下硬壳层的液化过程。

在研究区内取1m深度的原状样,运回实验室测量土体的成分和基本物理力学指标;利用沈阳建科院仪器研究所研制的WG-11型电子普氏贯入仪在原位测量土体的贯入阻力。仪器最大量程为1000N,灵敏度为0.01N,最大贯入深度为150cm。测试过程通常由3人完成,一人贯入仪器,一人读数,一人记录。

在广利港研究区,进行人工模拟波浪荷载引起硬壳层液化过程的现场振动试验。具体步骤包括:(1)将振动荷载板平放在试验场地,其直径约61cm;(2)沿荷载板周边采用洛阳铲钻孔,在10、20、30、40、60和80cm 6个深度内分别埋设孔压探头,用以监测振动过程的孔压变化;(3)探头之间用取出的原状土密封好,以免超孔隙水压沿钻孔贯通(图2);(4)采用重量为6.0kg的重锤从50cm高度处自由落体捶击荷载板模拟波浪荷载,捶击周期为5s,连续振动2h;(5)同时在振动前、振动结束时和恢复24h后测量土体的贯入强度。

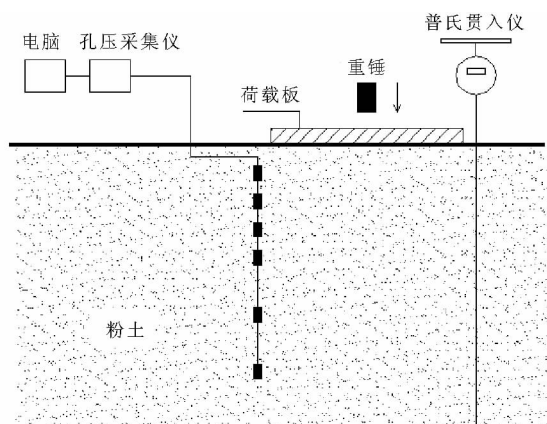


图2 试验仪器布置图

Fig. 2 The layout of instruments

3 硬壳层的物理力学特征

黄河废旧河口和现行河口水下三角洲均存在沉积硬壳层,通过静力触探资料发现在10m深度内可存在2~3层,每层的厚度约为2m,其强度明显大于上覆和下卧土层的强度。

3.1 硬壳层的物理及压缩性质

原位取1m深度的土体进行土工试验,分析沉积物的矿物成分、粒度组成和物理指标,其中刁口地区的试验结果为:

(1)主要矿物成分为石英、长石、方解石、白云石和部分粘土矿物,碎屑矿物含量为70~80%。其中,石英含量最大,占40%左右,其次为长石,占20%左右,方解石占10%左右,白云石最少,只有1%~3%的含量^[2]。

(2)经粒度分析,硬壳层沉积物中砂粒、粉粒和粘粒均有一定的含量,砂粒含量相对较小,平均约为16%;粉粒占多数,含量位于44%~87%之间;粘粒含量也相对较小,平均约5%。

(3)从表1可以看出,硬壳层的含水量位于21.8%~30.5%之间,平均值为24.8%;饱和度位于86%~100%之间,基本处于完全饱和状态;压缩模量位于6.2~14.3MPa,压缩性中等,且随着深度的增大,压缩性有所降低;对硬壳层超固结比的测定表明,硬壳层处于明显的超固结状态,随着深度增大呈现衰减,由表层的233逐渐降低到86cm深度处的7.6。

表1 硬壳层若干物理指标

Table 1 Physical parameters of concrete layer

深度/ cm	含水量/ (%)	饱和度/ (%)	孔隙比	压缩模量/ MPa	超固 结比
0~3	21.8	86	0.68	6.2	233
14~20	23.5	100	0.61	8.5	58.3
30~34	24.9	100	0.67	6.6	25.4
44~48	27.7	97	0.77	6.4	17.9
58~61	22.1	91	0.65	10.7	11.1
71~74	30.5	100	0.90	13.4	8.6
84~88	23.0	89	0.70	14.3	7.6

3.2 硬壳层的贯入强度

采用普氏贯入仪测量4个研究区的土体强度,沿某条测线,每10m布置一个测点,每个测点沿竖直方向连续贯入60~90cm,每5cm深度记录一个贯入阻力,每条测线长200m,测量结果汇总于表2中。可以看出,在60cm深度内,土体强度随着深度的增加而增大,且与深度基本成线性关系。

表2 4个研究区土体贯入强度的统计值
Table 2 The statistics of soil proctor strength
at four study areas

地区	深度/ cm	贯入强度/N			
		最小值	最大值	均值	变异系数
大王北	10	79	396	226	0.36
	20	197	545	355	0.31
	30	223	810	442	0.34
	40	242	875	505	0.35
	50	263	935	556	0.35
	60	262	903	631	0.28
刁口	10	103	542	213	0.53
	20	120	854	274	0.71
	30	131	926	300	0.67
	40	116	1007	475	0.52
	50	147	890	468	0.48
	60	136	1102	554	0.50
新滩	10	36	139	74	0.37
	20	66	340	159	0.48
	30	55	298	182	0.37
	40	124	380	228	0.36
	50	110	599	251	0.59
	60	101	615	207	0.58
广利港	10	40	160	102	0.33
	20	100	223	166	0.23
	30	110	252	181	0.24
	40	161	339	253	0.23
	50	202	510	301	0.31
	60	151	673	366	0.44

4个研究区中,大王北和刁口地区的贯入强度较大,新滩和广利港的相对较小,大王北各个深度的平均贯入强度位于226~631N,刁口地区的为213~554N,新滩地区的为74~251N,广利港地区的为102~336N。前两者强度约为后两者的两倍,这是因为前两者的沉积固结时间要比后两者的时间要长,大王北和刁口的土体主要由1964~1976年黄河走河刁口流路期间形成的,新滩和广利港的主要由1976年~至今黄河走河清水河形成的,其沉积固结时间比后两者的长约22a。固结时间越长,土颗粒之间的胶结程度越好,在各种动荷载的影响下土颗粒趋于密实稳定,强度越高。

土体强度不但在深度上具有非均匀性,表现为沿着深度方向强度增大,在水平向上也具有非均匀

性,在同一深度处,沿着水平方向上强度不同(图3)。这种非均匀性一般认为是由于波浪不均匀荷载引起的,文献[3]通过计算波浪在海床内引起的孔压分布,认为波浪产生的超孔压可携带土颗粒产生运移,并且该地区生物活动的洞穴加速这种运移过程。土颗粒的运移引起了强度的非均匀性,此外这种非均匀性尺度与波长相关,波长越大,这种非均匀性越不明显。

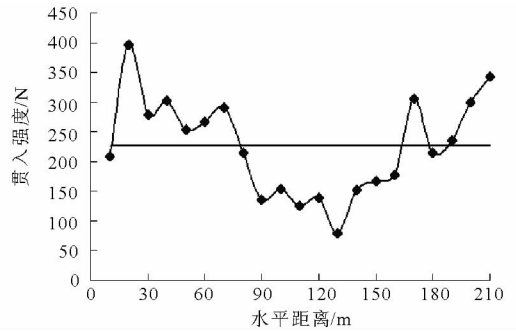


图3 大王北10cm深度处的贯入强度

Fig. 3 The proctor strength at depth of 10cm at north of Dawang study area

某深度处土体强度的非均匀性大小可以通过变异系数大小反映出来。大王北、刁口、新滩和广利港4个地区强度的变异系数分别位于0.28~0.36、0.48~0.71、0.36~0.59、和0.23~0.44之间。可以看出,离河口近的地区,土体强度的变异系数比远地区的要大,表现出更强的非均匀性。离河口近的地区,在固结过程中受河流和波浪的共同作用也强。

堆积在河口地区的沉积物,在正常海况下,处于沉积固结过程,当遇极端海况时,河口附近沉积的土体在波浪水动力的作用下,可发生液化—侵蚀—悬浮—运移等过程,原先沉积的土体被带到离河口更远的地区。

4 循环荷载下硬壳层液化过程

4.1 硬壳层的振动液化

在广利港研究区进行现场振动试验,模拟波浪对硬壳层的作用。在振动过程中,不同深度处孔压均有不同程度的增加,且孔压随振动次数增加而变化(图4)。可以看出:(1)10~40cm深度处的孔压增幅较大,而60cm和80cm深度处孔压增幅较小;(2)孔压增长经历了4个阶段,即初始阶段、增长阶

段、稳定阶段和衰减阶段。

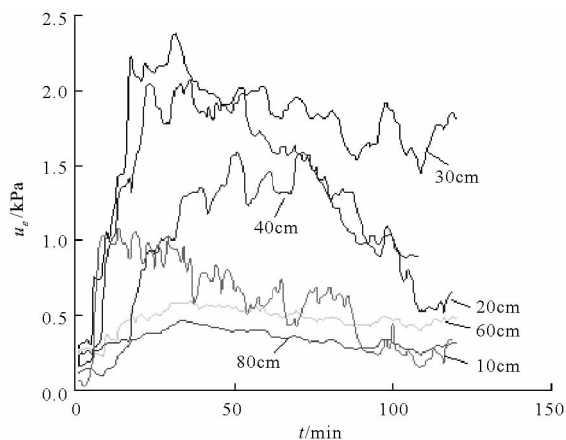


图4 振动过程中的孔压变化曲线

Fig. 4 The pore pressure variation in the vibration test

(1)初始阶段,在这个阶段里,振动刚刚开始,由于粉土某些土颗粒之间具有一定的胶结强度,大部分胶结强度尚未丧失,能够承担一定的上部循环荷载,孔压增加缓慢。

(2)增长阶段,随着振动荷载的持续,土颗粒之间的胶结强度逐渐丧失,土颗粒不能够承担外部应力,进而转化为由孔隙水承担,孔压迅速增大。

(3)稳定阶段,当土体完全液化或者孔压累积的速率等于消散的速率时,孔压不再增大,进入稳定阶段。

(4)衰减阶段,孔压在稳定阶段后期,振动荷载使得土颗粒进一步压密,孔隙水不断排出,孔压减小,这一阶段为衰减阶段。

振动过程中,初始阶段一般维持在10min内;增长阶段在5~20min之间,且越紧接表层,达最大值经历时间越短;从振动开始到孔压达到最大值一般在15~30min内。

从消散速率上,可以看出表层土体的消散速率要大于深层的,这是因为表层土体向上排水路径较短,孔隙水排水容易,消散速率比深层的要快。

现场振动的孔压增长模式与室内动三轴试验的有所不同,室内动三轴试验中土体一般在不排水条件施加动荷载,孔压达最大值后不会出现衰减,而实际场地中,当波浪循环荷载作用在海床表面上时,孔压可向上或向下两个方向消散,而存在消散阶段。

根据有效应力原理,当超孔压达到有效上覆应力时,土体完全液化,强度完全丧失。

$$u_e = \sigma'_v = \gamma' z$$

式中, γ' 为土体的有效重度, z 为土体深度。

研究区硬壳层的有效重度约为 $9.8\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$,10cm、20cm和30cm深度处的有效重度分别为0.98kPa、1.96kPa和2.94kPa,在振动过程中分别监测到的最大超孔压分别为1.02kPa、2.03kPa和2.42kPa。可见10cm和20cm深度处的土体发生液化,30cm以及以下深度处均未发生液化。

土体液化过程中,产生的超孔隙水压力携带粘性小的土颗粒沿着强度薄弱部分渗流到地面,形成“泥火山”(图5),与地震工程中的“喷砂冒水”类似。“泥火山”直径约为1~3cm,高度较小,渗流出的孔隙水夹杂着土颗粒散落在“泥火山”周围。振动结束后,“泥火山”仍然喷发,但喷发力度有所减弱,一段时间后停止。“泥火山”的产生也是判断土体在振动过程中出现液化的标志之一。

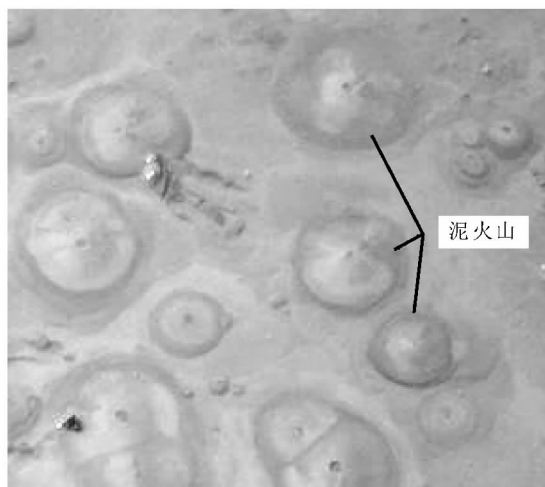


图5 液化过程中出现的“泥火山”

Fig. 5 “Mud volcano” appeared in soil liquefaction

4.2 硬壳层液化引起的强度变化

振动前后均采用普氏贯入仪测量土体的贯入阻力,发现在振动刚刚结束时,土体强度均有下降。并且表层(10~20cm),中层(20~50cm)和底层(60~80cm)下降的程度不同,中层下降的程度最大(图6)。

振动后土体强度比振动前的减小程度为:表层减小约20%~40%;中层减小35%~50%;底层仅为10%~20%。这是因为测量土体强度时,表层土体已经排出一部分水,强度有所恢复;中层土体的排水相对较难,测量土体强度时,孔压只有少量消散,强度恢复较小;底层土体受到的振动能量较小,所以

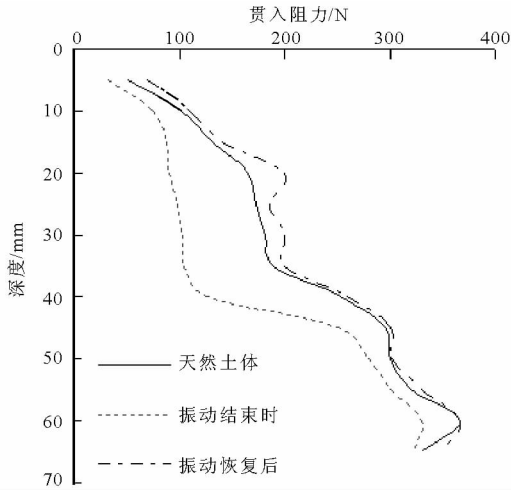


图6 振动引起的土体强度变化

Fig. 6 Variation of soil strength caused by vibration

孔压增幅也较小,土体强度降低较小。

土体振动结束恢复 24 小时后,强度会略微增加,其中表层和中层增长的幅度要大于底层的。强度增大的原因有:(1)对于未受扰动的沉积土,特别是新近沉积的土体,土颗粒的长轴方向杂乱不一,当有竖向循环荷载作用于土体时,土体内部产生竖向的循环应力作用于土颗粒,土颗粒有呈水平方向转动的趋势,土体孔隙比进一步减小,表现为竖向沉降,水平向的土颗粒与方向杂乱不一的土颗粒相比,在竖向具有更好的稳定性。(2)在竖向循环荷载的作用下,超孔隙水压力反复累积和消散,孔隙水排出,使得土体类似于动力固结过程。循环荷载作用后,静止一段时间,孔隙水进一步排出,土颗粒之间的粘结强度恢复一定程度,与荷载刚停止作用时,土体强度进一步增大。

5 波浪作用下硬壳层的液化计算

5.1 波浪和土体参数

极端海况下,研究区内迅速增水,已观测到的增水深度超过 6m。取最不利的海况下分析硬壳层的液化情况,当水深为 6m 时,根据波浪要素推算^[10,11](表 3)。

如上所述,4 个研究区土体强度在水平向上表现出非均匀性,某一深度处沿水平向的强度并非定值,取其均值作为该研究区的液化计算强度(表 2)。

表 3 波浪计算参数

Table 3 Wave parameters

风浪等级	波高 $H_{1/10}$ /m	周期 T /s	波长 L /m
6	1.7	4.6	28.5
7	1.9	4.9	31.9
8	2.4	5.4	35.8
9	2.6	5.7	38.2
10	2.8	6.0	40.5

5.2 液化计算模型简介

采用判别液化的简易经验法研究硬壳层的液化情况,该法分别计算波浪传播过程中,在海床内引起的循环应力比和土体本身具有的循环阻抗比,比较两者的大小,当前者超过后者时,判断土体液化,否则土体不液化。

波浪沿着海面传播时,可视为一系列无穷数目、具有恒定波浪参数(波高、波长和周期)的单元波组成。当波浪为简谐波时,在海床内引起的循环应力比(cyclic stress ratio, CSR)为:

$$CSR = \frac{(\tau_{vh})_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{2\pi}{\rho' g L} \frac{P_0}{L} \exp\left(-\frac{2\pi z}{L}\right) \quad (1)$$

$$\sigma'_v = \rho' g z$$

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

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

Nataraja and Gill (1983)^[11]建立了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:

$$CRR = 0.009 N_1 = 0.009 C_N N \quad (2)$$

式中, N_1 为修正的标贯击数, N 为实测标贯击数。

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:

$$C_N = 1.82 \exp(-0.4 \sigma'_v / P_a) \quad (3)$$

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

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 与贯入强度 q_p 的经验关系:

$$N = (q_p - 26.97) / 29.54 \quad (4)$$

式中, q_p 为贯入强度(N)。

整理式(2)、(3)和(4)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:

$$CRR = C_N(3.05 \times 10^{-4} q_p - 0.0082) \quad (5)$$

5.3 硬壳层液化计算分析

由公式(1)和(5)分别计算4个研究区在各级风浪作用下的循环应力比和循环阻抗比,计算结果绘制于图7中。当CRR小于CSR时,土体液化,反之不液化,CRR与CSR的交点对应的深度即为某级风浪作用下的液化深度。

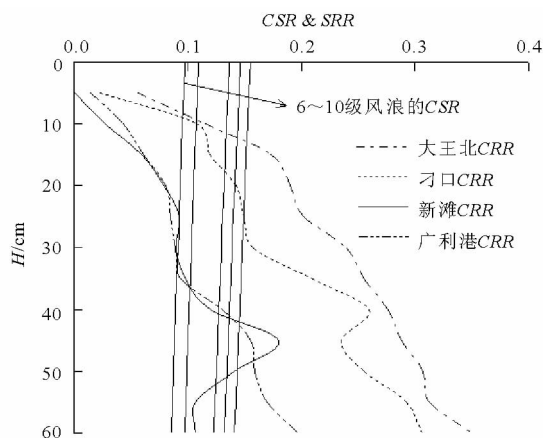


图7 4个研究区硬壳层在6~10级风浪下的液化深度

Fig. 8 The concrete layer liquefaction depth at 6th ~ 10th storm at four study areas

从图7可看出,风浪强度越大,液化深度越大。4个研究区中,大王北地区的土体抗液化能力最强,液化深度最小,在6~10级风浪作用下的液化深度仅为7~11cm;刁口地区6~7级风浪下的液化深度与大王北的相近,但在8~10级作用下液化深度达18~23cm;新滩和广利港的土体强度相对较低,抗液化能力也较差,在6~10级风浪作用下的液化深度为32~42cm。

图7中液化深度是采用研究区的平均强度计算的,如上所述,土体强度在水平向上具有非均匀性,强度比平均值低的土体液化深度要大于图7中的数值,相反,高于平均强度的区域,土体液化深度要小于图中的数值,这就造成了在水平向的液化非均匀性。土体液化后,强度完全丧失,容易在波浪和潮流水动力的作用下发生侵蚀,原场地土体缺失。强度高的区域,相对强度低的区域土体缺失量少,这就造成了地貌上的非均匀性,表现为海床表面的凹凸不平。

6 结论

选择黄河口硬壳层典型研究区,现场和室内测试其强度特征;设计实施现场振动试验,研究液化机理;最后通过理论计算研究4个硬壳层研究区在不同风浪等级下的液化深度,得出了以下结论:

(1)硬壳层土体基本上处于饱和状态,且处于超固结状态,超固结比随深度的增加而减小;

(2)大王北和刁口地区的贯入强度约是新滩和广利港的两倍,其原因是前两者的固结时间比后者的要长;

(3)离河口近的地区,硬壳层强度的变异系数比远的地区要大,非均匀性也大,可能是近的地区同时受河流和波浪两者的共同作用明显;

(4)振动引起硬壳层液化过程中,孔压增长经历4个阶段,即初始阶段、增长阶段、稳定阶段和衰减阶段,且表层土体达到液化,深层的未液化;

(5)现场振动试验,发现广利港地区硬壳层20cm深度处发生液化,30cm深度以下未发生液化;

(6)液化过程中,引起了土体强度的变化,中层(30~40cm)的变化最大,表层和底层的相对较小;

(7)大王北地区硬壳层的液化深度较小,在6~10级风浪作用下的液化深度仅为7~11cm;刁口地区6~7级风浪下的液化深度与大王北的相近,但在8~10级作用下液化深度达18~23cm;新滩和广利港硬壳层在6~10级风浪作用下的液化深度达32~42cm。

参 考 文 献

- [1] Morgan J. P., Coleman J. M., Gagliano S. M.. Mud slumps at the mouth of South Pass, Mississippi River sedimentology, paleontology, structure, origin and relation to deltic processes [J]. Coastal Studies, Louisiana University, Baton Rouge, 1963, (10): 190~215.
- [2] 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. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 876~881.
- [3] 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. Research of consolidating inhomogeneity of silt seabed in Yellow River estuary shore. Rock

and Soil Mechanics, 2006, **27**(7):1147 ~ 1152.

- [4] 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.

Yang Shaoli, Shen Wei-quan, Yang Zuosheng. The mechanism analysis of seafloor silt liquefaction under wave loads. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(4):28 ~ 37.

- [5] 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. Factors of geo-hazards in the modern Yellow River subaqueous delta. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, **26**(4):37 ~ 43.

- [6] 陈卫民,杨作升, Prior, D. B., 等.老黄河口水下底坡不稳定性研究[A].黄河口水下底坡不稳定性[C].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. Submarine Slope Instability of the Yellow River Mouth. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1991, 43 ~ 56.

- [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.

Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, **25**(6):573 ~ 581.

- [8] Prior D. B., Suhayda, J. N., Lu N. Z., et al. Storm wave reactivation of a submarine landslide[J]. Nature, 1989, **34**(7):47 ~ 50.

- [9] 白冰.冲击荷载作用后软粘土的再固结[J].长江科学院院报,1998,**15**(3):50 ~ 53.

Bai Bing. The reconsolidation of soft clay caused by impact load. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, **15**(3):50 ~ 53.

- [10] 丰鉴章,李元智等.海岸工程中的海浪推算方法[M].北京:海洋出版社,1987.

Feng Jianzhang, Li Yuanzhi, et al. Wave projection methodology in marine engineering. Beijing: Ocean Press, 1987.

- [11] Nataraja, M. S., and Gill, H. S. Ocean wave-induced liquefaction analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, Proceedings, ASCE, 1983, **109**(GT4):573 ~ 590.

- [12] 单红仙,刘涛,陈友媛,贾永刚,刘红军.波浪载荷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 ~ 221.

Shan Hongxian, Liu Tao, Chen Youyuan, Jia Yonggang, Liu Hongjun. In situ measurement of vertical transfer of sediment in the silty seabed under wave loading in the Yellow River estuarine area. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(2):216 ~ 221.

新 书 介 绍

《 5.12 汶川地震地质灾害 》

作者:伍法权,胡瑞林,岳中琦等,地质出版社出版

本图集着重反映此次地震的次生地质灾害状况,主要包括汶川地震地质背景、滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等地质灾害的特点,以及这些次生地质灾害对建筑物、路面、桥梁等造成的破坏背景。本图集科学、系统地反映了汶川地震地质灾害的形成、发育规律,既有直观表述,又有一定深度的分析,可供地震、地理、地质、地质工程、岩土工程等地球科学的科研、教学人员参考使用,也可供减灾、防灾及相关业务人员使用

全书定价:150元,邮费20元。

有需要的读者,请与工程地质专业委员会、工程地质学报编辑部联系购买事宜。

汇款邮寄地址:100029,北京9825信箱《工程地质学报》编辑部

联系电话及邮箱:010-82998121

gdz@mail.igcas.ac.cn

