

波浪作用下埕岛海域粉质土海床的累积液化

常方强^{1,2}, 贾永刚²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266110)

摘要: 给出基于一维比奥固结理论的粉质土海床波致累积液化的简化计算方法. 以黄河口埕岛海域海床为例, 通过动三轴试验测试粉土孔压增长状况, 回归得到孔压增长参数 $a=0.613, b=0.185$. 通过计算表明, 埕岛海域粉质土海床水深 7~8 m 处, 海床液化深度最大, 在 50 a 一遇的波浪荷载作用下, 液化深度达到 5.2 m, 这与该区地质灾害扰动深度和地质灾害在此水深处相对集中相对应.

关键词: 波浪; 粉质土; 液化; 埕岛海域; 海床

中图分类号: TU 431

文献标志码: A

极端海况下, 波浪力在海床内形成循环应力, 某些海床土结构体因彼此之间失去束缚力以致溃散悬浮于水中, 而其悬浮土的质量转由孔隙水所承载, 出现液化^[1]. 波浪作用下, 海床土体的孔隙水压力逐渐增长, 包括瞬时孔压和累计孔压两部分. 瞬时孔压是土体孔压随波浪瞬时增大或减小引起的, 在一个波浪周期内循环出现; 累积孔压是随着波浪作用时间的持续, 土体孔压逐渐累积形成的. 海床土体的液化能够引发一系列灾害^[2-4], 威胁到海洋工程设施的安全性. 波浪作用下海床液化过程, 即液化随着时间的变化过程是学者和工程师们关注的问题. 目前, 有关海床液化的理论计算大都是针对砂质海床的. 杨少丽等^[5]将海床视为均质弹性体, 利用数值方法计算了风暴潮期间粉砂的液化深度, 并分析了液化机理. 刘红军等^[6]基于理论方法计算了砂质海床随时间的液化过程. Jeng 等^[7]分别计算了砂质海床瞬时液化和累计液化过程. 然而, 砂土与粉质土的颗粒组成、粘粒含量等都不同, 在循环荷载作用下孔压增长过程和抗液化强度等也不同. 一般情况下, 相比砂质海床, 粉质土由于含有一定粘粒, 波浪作用初期瞬时液化(瞬时孔压增长导致的液化)不太容易发生, 而累计液化(累积孔压增长导致的液化)占主导地位. 因此, 砂质海床液化理论在粉质土海床中不一定适用. 本文针对粉质土海床液化情况, 给出了一种粉质土海床波致液化的简化计算方法; 然后进行动三轴试验, 测试计算模型中的参数; 最后以黄河口埕岛海域海床为例, 研究波浪作用下粉质土海床的液化过程及影响因素.

1 理论模型

波浪引起海床的累积孔压(又称为残余孔压或超孔压)可基于一维比奥固结理论求解^[7], 即

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial z^2} + f(z). \quad (1)$$

式(1)中: \bar{p} 为累计超孔压; c_v 为固结系数; $f(z)$ 为源项, 未考虑孔压消散作用时的孔压增长速率; z 为海床深度; t 为时间.

其源项 $f(z)$ 的表达式^[8]为

$$f(z) = \frac{\sigma'_0}{T} \left(\frac{\tau}{a\sigma'_0 D_r} \right)^{1/b} = \frac{\rho' g}{T} C z \exp(rz), \quad (2)$$

收稿日期: 2012-02-16

通信作者: 常方强(1980-), 男, 副教授, 主要从事环境岩土灾害的研究. E-mail: changfq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA09Z109); 国家自然科学基金资助项目(40876042); 华侨大学高层次人才科研启动项目(09BS621)

$$C = \left[\frac{\rho_w \pi H / L}{\rho' a D_r \cosh(kd)} \right]^{1/b}, \quad r = \frac{k}{b}.$$

(3)

式(3)中: ρ_w 为海水密度; ρ' 为土体水下密度; H 为波高; L 为波长; D_r 为土体相对密度; k 为波数, $k=2\pi/L$; d 为静止水深; T 为波周期; a, b 为土体孔压产生速率的参数,由试验室测试或现场资料确定。

求解一维比奥固结理论中的累计孔压可以根据差分法或有限元法,但式(1)的求解相对比较繁琐.对于式(1)的右端, c_v 项为超孔压的消散项, $f(z)$ 为波浪导致的超孔压累积项.在砂土海床内,渗透系数较大,消散项作用相对明显,忽略消散项会带来一定的误差.但在粉质土海床内,包括粉土、粉质粘土和粘土海床,其渗透系数较小,仅为 $10^{-4} \sim 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,在 1 个水力梯度下,若干小时内渗透距离仅为 $0.1 \sim 0.001 \text{ cm}$,消散过程和孔压累积相比,消散作用甚微,因此消散项完全可以忽略.即可得到

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = f(z),$$

(4)

$$\bar{p} = f(z)t.$$

(5)

波浪作用下,当海床超孔压达到土体有效上覆应力时,土体出现液化,即

$$\frac{\bar{p}}{\sigma'_0} = 1.$$

(6)

式(6)中: σ'_0 为土体有效上覆应力, $\sigma'_0 = \gamma z$, γ' 为土体有效重度。

为了检验上述忽略孔压消散项带来的计算误差,以砂土海床^[7]和粉土海床为例,计算忽略消散项带来的误差.计算参数:波浪有效波高为 5.2 m,波长为 70.6 m,周期为 8.6 s,水深为 8.0 m;砂质海床土体水下密度为 $9.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土体相对密度为 0.7,渗透系数为 0.4 mm,孔压产生速率参数 a, b 分别为 0.246 和 0.165;而粉土海床的水下密度为

表 1 两种海床各深度处的孔隙水压力

Tab.1 Pore pressure at different depths of two kinds of seabed

海床类型	z/m	p/kPa		$e/\%$
		考虑消散项法	简化方法	
砂土海床	1	133.22	138.84	4.0
	3	137.34	141.62	3.0
	5	77.32	80.26	3.7
	7	36.11	38.20	5.5
粉土海床	1	38.11	38.45	0.9
	3	43.08	44.07	2.3
	5	27.89	28.06	0.6
	75.5	14.77	15.01	1.6

9.2 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土体相对密度为 0.3,渗透系数为 2.0 μm ,孔压产生速率参数 a, b 分别为 0.613 和 0.185.对于砂土海床和粉土海床,采用考虑孔压消散项的方法和本文的简化方法分别计算砂质海床波浪持续作用 5 min 和粉土海床波浪持续作用 30 min 时海床各深度处的孔隙水压力,结果如表 1 所示.表 1 中: z 为海床深度; p 为孔隙水压力; e 为计算误差。

从表 1 可以看出:对于砂土海床,忽略孔压消散项带来的计算误差为 3.0%~5.5%,而对于粉土海床,计算误差为 0.9%~2.3%,误差范围完全可以接受,而忽略消散项可以使计算过程大大简化。

2 实例分析

以黄河口北部的埕岛海域为例,计算该海域海床在极端海况下的累积液化程度.该埕岛海域位于黄河三角洲的北部地区,主要是在 1953—1964 年黄河走河神仙沟流路和 1964—1976 年走河刁口流路期间形成的两个亚三角洲,如图 1 所示.该埕岛海域的地理位置图包括河道演化、主要城镇位置,坐标为 1954 年北京坐标系,由高斯克列格投影(中央经线 117°)得到,其中胜利油田重要的产油区埕岛油田就坐落在该海域上,因石油开发,建有大量石油工程设施,如石油平台、海底

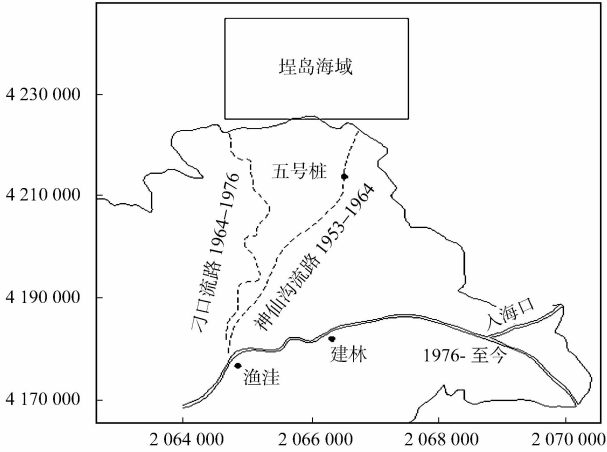


图 1 黄河口埕岛海域地理位置图
Fig. 1 Location of Chengdao sea

管线和防波堤等.

埕岛海域海底斜坡水深较小,在 20 m 以内,整体上离河口距离越远,水深越大. 埕岛海域北部,越向北,水深越大;在东部,越向东,水深越大. 该海域海床表层土体以粉质土为主,包括粉土、粉质粘土、粉砂和淤泥质土. 受冬季和春季西北风引起的强浪影响,该海域海床发育有多种地质灾害,如冲沟、塌陷洼地、滑塌和滑坡遍布^[2-4]. 强波浪作用下,海床土体孔隙水压力逐渐累积,当超孔压达到有效上覆应力时,出现完全液化,抗剪强度完全丧失. 海床土体进一步在波浪力和自重作用下,容易发生侵蚀、坍塌、流滑等一系列地质灾害,进一步威胁到该区石油工程设施的安全性.

2.1 孔压模型参数试验确定

在计算波浪引起的累积孔压时,需首先确定累积项中的参数 a, b . 下面,采用动三轴试验确定这两个参数的数值.

在黄河口埕岛海域海床内取粉土原状样,运回试验室进行颗分和动三轴试验. 经筛分法和比重法测试,粉土各粒径(D)的质量分数(w),如表 2 所示.

表 2 粉土各粒径的组成
Tab. 2 Particle size composition

D/mm	>0.25	$0.25\sim0.125$	$0.125\sim0.063$	$0.063\sim0.032$	$0.032\sim0.016$
$w/\%$	0.52	0.33	1.78	9.37	42.66
D/mm	$0.016\sim0.008$	$0.008\sim0.004$	$0.004\sim0.002$	$0.002\sim0.001$	<0.001
$w/\%$	31.69	8.54	2.57	1.13	1.41

由于黄河口东北向强浪平均周期为 $4.2\sim5.6\text{ s}$ ^[9],试验动荷载周期均设定为 5 s ,考虑到液化土体的埋深为 $1.0\sim10.0\text{ m}$,围压均取 100 kPa ,固结比 K_0 取 1.0 . 共进行 5 个试样的试验,考虑到海床波压力的大小,5 个试样(分别称为 1#土样、2#土样、3#土样、4#土样和 5#土样)施加的动荷载分别为 $10, 25, 40, 65$ 和 80 kPa . 试验仪器采用西安力创材料检测技术有限公司生产的土体动三轴试验机,以孔压比达到 1.0 或者轴向应变为 10% 作为判断液化的标准.

试验土样按行业标准 SL 237—1999《土工试验规程》规定的方法,采用抽真空-循环脱气水并施加反压的方法使试样饱和,然后在规定的固结压力状态下固结;固结稳定后,在不排水条件下对试样施加竖向循环应力 σ_d ,侧向应力保持不变,这样在 45° 平面上产生循环应力 $\tau_d=\sigma_d/2$;然后,用 τ_d 模拟波浪发生时在海床内产生的剪应力. 测得的孔压增长曲线,如图 2 所示. 图 2 中: N/N_f 为循环次数比; r_u 为孔压比.

根据式(2), D_r 取 0.5 , $T=5\text{ s}$,根据围压 100 kPa 和孔压增长曲线(图 2),得到回归孔压增长参数 a, b . 取 5 个土样孔压增长曲线回归的 a, b 平均值,经计算得到 $a=0.613, b=0.185$.

2.2 计算结果与分析

波浪作用下海床土体液化状况除了受海床土质因素影响外,还受波浪作用时间、荷载大小、海水深度和海床深度等因素的影响. 下面讨论各影响因素对计算结果的影响.

- 2.2.1 作用时间 随着波浪作用时间的持续,液化深度逐渐增大,但最终趋于某一稳定值. 波浪荷载作用初期,土体结构破坏程度较低,土体孔隙水压力较小,土体没有出现完全液化;随着荷载的持续作用,更多的土颗粒丧失了原来的结构,孔压增大,最终出现完全液化. 根据式(5),波浪引起的海床超孔压(p)随时间(t)的变化过程,如图 3 所示. 图 3 中: z 为海床深度,波浪为 50 a 一遇,水深为 8 m ,有效波高为 5.2 m ,波长为 70.6 m ,周期为 8.6 s .
- 2.2.2 荷载 波浪重现期越长,其荷载越大,在海床内引起的循环剪应力也越大,越易引起土体的液化. 根据式(5),当水深为 8 m 时,不同波浪荷载在海床不同深度(z)处引起的超孔压(p),如图 4 所示.

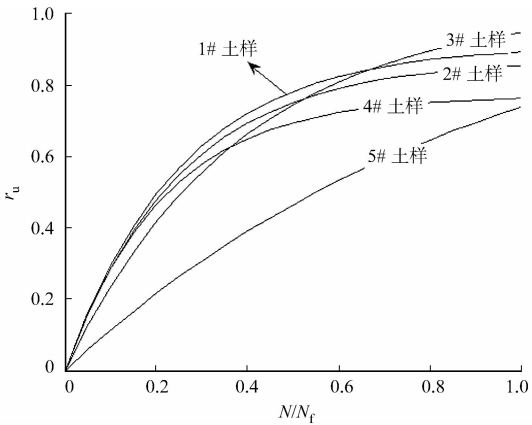


图 2 黄河口粉土孔压增长曲线
Fig. 2 Curve of pore pressure increment

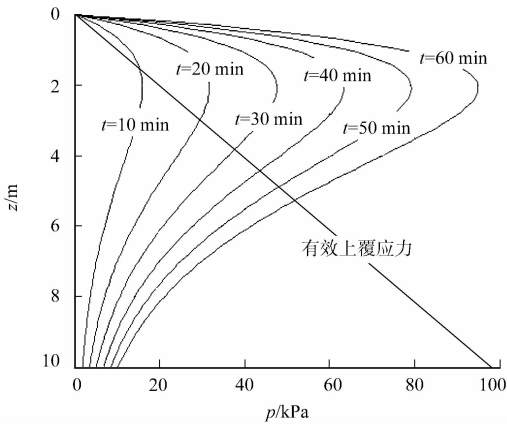


图 3 超孔压随波浪作用时间的变化

Fig. 3 Excess pore pressure variation with wave time

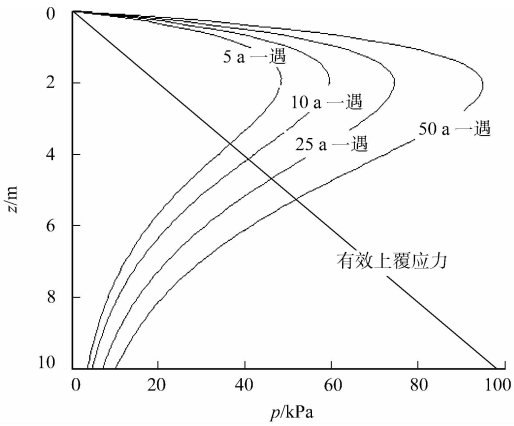


图 4 波浪荷载大小对超孔压的影响

Fig. 4 Influence of wave load on excess pore pressure

2.2.3 海水深度 根据式(5)和式(6),分别计算在 5,50 a 一遇的波浪作用下,波浪持续作用时间为 1 h,埕岛海域不同水深(d)处海床的液化深度(h),计算结果绘制如图 5 所示.由于各水深波浪参数众多,不便罗列,详见文献[10].由图 5 可以看出:在 5 a 一遇的波浪作用下,最大液化深度为 4.2 m,出现在水深为 7 m 的地方;在 50 a 一遇的波浪下,最大液化深度达到 5.2 m,出现在水深为 8 m 的地方.海床土体液化最大深度出现在水深 7~8 m 的地方,这是因为在该水深处,波压力最大;当小于此水深时,强风引起的波高和波长相对较小,引起的波压力也较小;当大于此水深时,波压力在水深上的衰减较大,在海床表面引起的压力也相对要小.

在埕岛海域,水深 7~8 m 深度处,三角洲坡度最大,地形起伏也相对较大,一般大于 1.0 m,地质灾害发育最为集中,冲沟、塌陷洼地、滑塌和滑坡遍布,是整个海底斜坡最复杂、最不稳定的区域.该区域地质灾害的集中发育与该深度处波压力最大有关,该处海床土体最易液化.

海床土体液化后,在波浪作用下进一步加剧侵蚀、发生塌陷洼地、扰动破坏、滑坡等,现场调查表明埕岛海域海床破坏扰动深度多为 2.5~4.5 m,最大可达 5 m^[11-12],说明此深度处的土体可能出现液化,与本文计算的最大 5.2 m 较为接近.

2.2.4 海床深度 海床深度越大,波浪在海床内引起的循环剪应力越小,土体孔压越不易累积.如图 5 所示,最大累积孔压出现在海床约 2 m 深度处,向下或向上相对要小,当深度达到某一值时,循环剪应力较小,孔压累积较小.因此,对于某些海洋工程,如海底管线,埋置到一定深度时,海床液化不会影响到其稳定性.

3 结论

以黄河口埕岛海域海床为例,研究波浪作用下粉质土海床的液化过程及影响因素,可以得到以下 3 个结论.

1) 相对于波浪荷载作用下粉质土海床的孔压累积状况,孔压消散作用甚微,可以忽略.所给出的基于一维比奥固结理论的粉质土海床波致液化的简化计算方法,计算误差较小.

2) 通过对埕岛海域粉土的动三轴试验测试,对孔压增长曲线进行回归,分别得到了孔压增长参数 $a=0.613$, $b=0.185$,在分析该海域波致累积液化时可以参考使用这两个参数.

3) 通过计算表明,埕岛海域粉土海床在水深 7~8 m 处,海床液化深度最大,在 50 a 一遇的波浪荷

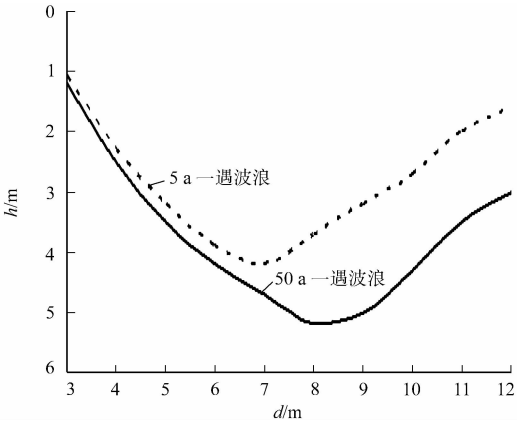


图 5 埕岛海域海床液化深度

Fig. 5 Liquefaction depth of the Chengdao sea

载作用下,液化深度达到 5.2 m,这与地质灾害扰动深度和地质灾害在此水深处相对集中相对应。

研究表明:所得到的成果对于了解海洋地质灾害形成、泥砂运移、河口演变过程及油田工程设施设计等具有重要意义。

参考文献:

[1] FODA M A,TZANG S Y. Resonant fluidization of silty soil by water waves[J]. Journal of Geophysieal Research, 1994,99(C10):20463-20475.

[2] PRIOR D B,YANG Z S,BORNHOLD B D,et al. 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.

[3] 常瑞芳,陈樟榕,陈卫民,等. 老黄河口水下三角洲前缘底坡不稳定地形近期演化与控制[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版,2000,30(1):159-164.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] JENG Dong-sheng,SEYMOUR B.GAO Fu-ping,et al. Ocean waves propagating over a porous seabed: Residual and oscillatory mechanisms[J]. Science in China Series E:Technological Sciences,2007,50(1):81-89.

[8] RAHMAN M S,JABER W Y. A simplified drained analysis for wave-induced liquefaction in ocean floor sands [J]. Soils and Foundations,1986,26(3):57-68.

[9] 成国栋,薛春亭. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京:地质出版社,1997:36-40.

[10] 常方强. 波浪作用下黄河口海底滑坡研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009:33-34.

[11] 孙晶. 埕岛海域海底滑动稳定性分区[D]. 青岛:中国海洋大学,2007:38-39.

[12] 许国辉,卫聪聪,孙永福,等. 黄河水下三角洲浅表层局部扰动地层工程特性与成因[J]. 海洋地质与第四纪. 2008,28(6):56-58.

Residual Liquefaction of Silt Seabed Induced by
Wave at the Chengdao Sea Area

CHANG Fang-qiang^{1,2}, JIA Yong-gang²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China

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

Abstract: One simplified silt seabed liquefaction calculation method induced by wave based on Biot one dimensional consolidation theory was put forward. Taking the Chengdao seabed at the Yellow River estuary as an example, the pore pressure growth of silt were measured in the dynamic triaxial tests, and the growing parameters $a=0.613$, $b=0.185$ were gotten. The calculation shows that the seabed liquefaction depth is maximum at the water depth 7—8 m, and under the wave loads with a recurrence period of 50 years, the liquefaction depth reaches 5.2 m, which corresponds with the geological disaster disturbed depth and the water depth of concentrated distributed geological disasters.

Keywords: wave; silt; liquefaction; Chengdao sea area; seabed

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)