

波浪作用下粉土中的孔压响应及其在粉土海床稳定性评价中的应用

陈 静¹, 冯秀丽², 林 霖²

(1.华东师范大学 资源与环境学院, 上海 200062; 2.中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 粉土在波浪等动荷载作用下极易发生液化破坏, 而孔隙水压力在粉土动力学行为中扮演了一个很重要的角色, 其发展变化会直接影响到土体的稳定性。因此, 通过室内波浪作用下的粉土孔压响应模型试验探讨了孔压与波浪之间的响应情况, 发现波浪能量的影响沿土层深度递减, 水深条件相同时, 响应的孔压随波高的增大而增加, 当波浪作用足够长时间后粉土发生液化破坏, 此时粉土内累积的孔压小于上覆土体的自重应力。根据结果提出了 1 种评价粉土海床稳定性的方法。

关键词: 粉土; 波浪作用; 超静孔隙水压力; 液化破坏

中图分类号: P333.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096 (2006) 03

粉土在波浪等动荷载作用下很容易产生液化破坏, 而在其液化破坏过程中, 孔隙水压力的发展变化扮演了一个很重要的角色, 孔隙水压力的变化对粉土海床的稳定性起着决定性的作用^[1]。而孔压在波浪作用下的变化是非常复杂的, 所以作者利用波浪槽模拟试验来探讨孔压的响应情况, 并就此提出了评价粉土海床稳定性的参考方法。

1 模型试验及结果

1.1 粉土孔压响应模型试验

试验在胜利石油管理局钻井工艺研究院滩海实验室进行, 水池长 56 m, 宽 24 m, 深 1.2 m, 内有 5 m × 5 m × 1.2 m 小池放置试验用土。

1.1.1 试验比尺

根据弗劳德模型律, 长度比尺采用 1:16, 时间比尺采用 1:4。水槽水深 (h) 拟采用 30, 40, 50, 60 cm, 相应于原型水深 4.8, 6.4, 8.0, 9.6 m。模型波高 (H) 拟采用 10, 12, 15, 20 cm, 相应于原型波高 1.6, 1.92, 2.4, 3.2 m。模型中波浪周期为 2.15 s, 相应于原型波浪有效周期 8.6 s。

1.1.2 试验用土的配置及其性质

试验用土取自耿井水源沉降库, 按照振动法配

置, 试验土的粒度成分见图 1, 力学性质指标如表 1。

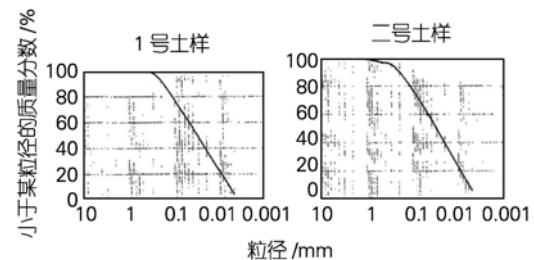


图 1 试验用土的粒度级配曲线

Fig.1 Grain gradation curve of soil samples

1.1.3 孔隙水压力传感器的布设

孔隙水压力传感器共 8 个, 沿两个垂直断面埋

收稿日期: 2003-12-11; 修回日期: 2004-07-22

基金项目: 国家 863 项目“海底土体原位静动态探测技术”; 华东师范大学优秀博士研究生培养基金资助项目

作者简介: 陈静 (1977-), 女, 山东烟台人, 博士, 从事环境演变及灾害方面的研究, 电话: 021-62232706, E-mail: jingpuppy@hotmail.com

设,每隔 5 cm 埋设一个,其余 3 个布设在第二个断面,用作补充和校对(图 2)。

表 1 试验用土基本物理力学性质指标

Tab.1 Physical and mechanical indexes of soil samples

含水率 (%)	土的容重 (kN/m ³)	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	内聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
25.3	20.0	24.8	19.2	5.6	7	26.1

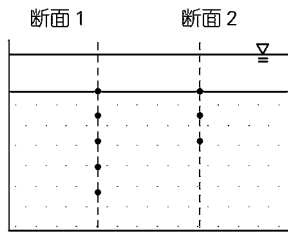


图 2 传感器布设示意图

Fig.2 Sketch of transducers arrangement

1.1.4 试验内容

本次试验一共进行了 3 个组次 11 组试验。组次 1 中的两组试验之间没有时间间隔,每种水深、波高组合作用 50 min 左右;组次 2 与组次 3 中的每组试验波浪作用时间为 1 h,每两组试验之间都有一定的间歇期,以保证前组试验在土体中可能累积的孔压充分消散,不影响后组试验的测试结果。具体试验安排见表 2。

表 2 试验组次安排

Tab.2 Arrangement of experiment groups

组次	组别	水深 (cm)	波高 (cm)
1	第 1 组	40	10
	第 2 组	40	15
2	第 1 组	30	10
	第 2 组	30	12
	第 3 组	40	13
	第 4 组	50	10
	第 5 组	50	15
	第 6 组	50	20
	第 7 组	60	10
3	第 1 组	40	10
	第 2 组	40	15

1.2 粉土中的孔压响应

以组次 1 测试结果为例,从第 1 组试验记录的孔压历时曲线(图 3)上可以看到,随着时间的增加,各层位孔压在开始时增加很快,过一段时间后中心线趋于平缓;根据第一断面上的传感器水头值换算,画出断面一剖面孔压累计曲线(图 4),同时在图 5 中,也可以看到孔压响应幅值从底面向下逐渐减少,说明波浪能量沿土层深度向下逐渐递减,产生的作用力向下也逐渐减小,响应的孔压也就小。

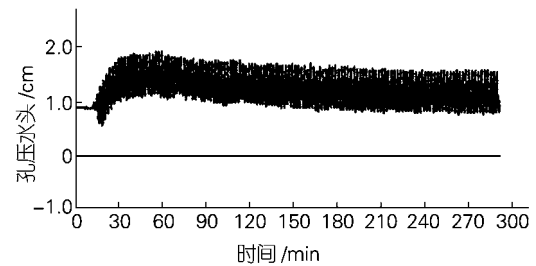


图 3 $h=40$ cm, $H=10$ cm, 埋深 5 cm 处孔压水头的历时曲线
Fig.3 Pore pressure time curve at the depth of 5 cm when $h=40$ cm and $H=10$ cm

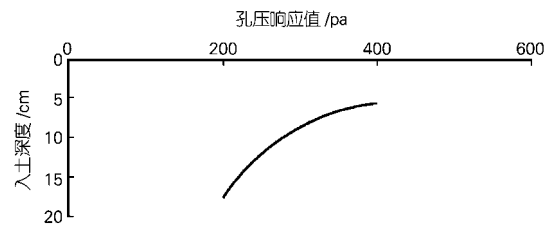


图 4 孔压随深度变化的曲线

Fig.4 Pore pressure changing curve with depth

由组次 1 第 1 组试验数据与组次 3 第 2 组试验数据得出的图 5 中,可以看出在波高 10 cm 的波浪作用下,孔压上升幅值较小,当波高增至 15 cm 时,孔压

传感器响应的幅值有了明显的上升。

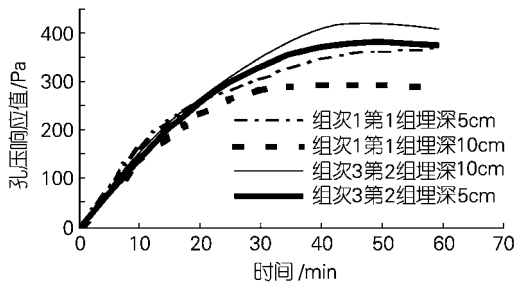


图5 组次1与组次3两组试验中不同埋深处的孔压变化曲线
Fig.5 Pore pressure curves at different depths in group 1 and group 3

在第2组试验中的水深40 cm、波高15 cm的波浪作用至38.5 min时(累积 $H=10$ cm, $h=40$ cm的50 min波浪作用),孔压急剧下降,见图6中的两条实线,对于埋深5 cm处,上覆土层的自重应力为500 Pa,孔压响应值450 Pa,接近土层的上覆自重应力,孔压急剧下降,可能发生了液化,土层已失稳。对于埋深10 cm处,上覆土层的自重应力为1 kPa,孔压响应值达750 Pa时,但孔压也急剧下降,说明也发生了液化破坏,可以得出响应孔压值在小于上覆土层的有效应力时候即可发生液化破坏。

从图6还可看出明显的孔压累积现象,根据组次3中第2组试验($H=40$ cm, $h=15$ cm)数据得出的两条虚线(埋深分别为5, 10 cm)明显比组次1中第2组(累积 $H=10$ cm, $h=40$ cm的50 min波浪作用)得出的两条实线的数值要小,并且累积前次波浪作用的组次1试验中的上层土体开始液化,而单一波浪作用的组次3试验中并没有出现土体液化的情况,换句话说,在前次波浪作用产生的孔压没有消散的情况下后继波浪继续作用所引起的土体破坏的可能性更大。

1.3 试验中的几点结论

(1) 孔压响应幅值从泥面处向下逐渐减少,波浪能量沿土层深度向下逐渐递减;(2)在一定波浪条件范围内,等水深时,孔压随波高的增大而增加;(3)可能引起液化的波浪必须作用足够长的时间,累积足够大的孔压才会发生液化破坏;(4)粉土发生液化的孔压不完全等于上覆自重应力,在小于上覆自重应力一定量时,就可能发生液化,这与上面已经液化有关。

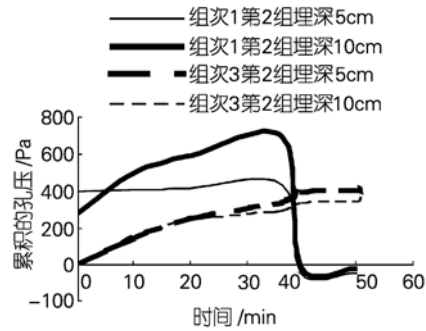


图6 组次1与组次3两组试验中不同埋深处的孔压变化曲线
Fig.6 Pore pressure curves at different depths in group 1 and group 3

2 孔压在粉土海床稳定性中的应用

2.1 利用总应力线初步判别粉土强度的变化

在波浪作用下,浅海沉积物中测得的孔隙水压力的变化并不能直接给出有效应力的变化,然而利用这些测得的数据和弹性理论和太沙基的有效应力原理可以算出近底床沉积物中有效应力的变化^[2]。

Polous和Davis1974年提出了一个利用弹性理论来计算由表面荷载引起的土体内总竖向应力变化的广义关系式:

$$\Delta\sigma_v = \frac{2Pz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

这里 P 为线性荷载的强度, z 为距沉积物表面的距离, x 为分析点与荷载作用点之间的水平距离,这一公式和土的类型没有关系。

上面的公式经过积分可以用来表示由任一形状表面荷载引起的竖向应力变化,积分式为:

$$\Delta\sigma_v = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2uz^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} dx \quad (1)$$

其中 u 为单位荷载强度。

通过有效应力原理可以得到有效应力的变化:

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u \quad (2)$$

根据波浪参数,利用(1),(2)式可以得出一条竖向总应力的变化线,如图7所示。

如果测得的孔隙水压力变化值落在曲线的右面,就意味着有效应力会减少,土体强度降低,土体有破坏的可能性;落在左边,有效应力就会增加,土体强

度增高,此时,土体没有破坏的可能性,如图7。

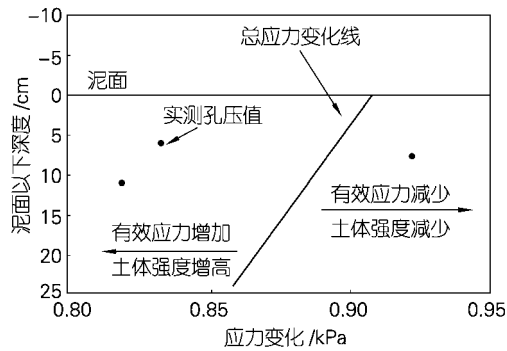


图7 有效应力变化判断图

Fig.7 Effective stress estimation by pore pressure

这种方法适用于不知道土的具体参数,只知道波浪参数的情况,只能给出土体的强度的增减,并不能明确地得知土体破坏的临界孔压值。

2.2 利用有效应力原理判别粉土海床稳定性

1925年 Terzaghi 提出有效应力原理,认为饱和土体所承受的总应力 σ 为有效应力 (通过土的骨架传递的应力) 与孔隙水压力 u (由水施加的通过孔隙中水来传递的压力) 之和^[3],如下式所示:

$$\sigma = \sigma' + u$$

也可写为: $\sigma' = \sigma - u$

即有效应力为总应力与孔隙水压力之差。

饱和土体在周期性应力作用下,例如在波浪作用下,颗粒之间趋于密实,孔隙度减小,土颗粒间的水分就需要排出以适应这一变化,但是尤其是对于粉土来讲,其颗粒之间的孔隙较砂土小,粘粒含量较砂土多,颗粒之间的水膜影响较大,这些都是阻止由于波浪动压力作用所产生的那部分孔隙水压力(超静孔隙水压力 u) 的及时排解,而且波浪加荷周期比较短暂,一个周期内孔隙水未来得及排出土体内维持原孔压所需减少的水量,下一个周期的波压又施加上来,这样,土体内超静孔隙水压力不断升高,土颗粒之间的有效应力必然减少。

当土体破坏时,由土体骨架传递的有效应力减少至0,也就是说超静孔隙水压力完全替代了上覆土层的有效应力时,土颗粒便悬浮在液体中,不能承受任何的剪应力。

理论上,用这一公式 $u =$ 可以用来判断土体的液化破坏的情况。

2.3 从模型试验中得出的粉土海床稳定性判别的参考方法

在上述孔压响应模型试验中,出现了两组土体不稳定现象,具体数据如下:

(1) $h=40$ cm, $H=15$ cm, $Z=5$ cm, $\sigma' = 500$ Pa, $u=450$ Pa;

(2) $h=40$ cm, $H=15$ cm, $Z=10$ cm, $\sigma' = 1000$ Pa, $u=750$ Pa。

根据长度比尺 1:16 换算,得出以下相对应的实际情况中的两组数据:

(1) $h=6.4$ m, $H=2.4$ m, $Z=0.8$ m, $\sigma' = 8$ kPa, $u=7.2$ kPa;

(2) $h=6.4$ m, $H=2.4$ m, $Z=1.6$ m, $\sigma' = 16$ kPa, $u=12$ kPa

仅从这两组数据就可以很明显的看出,由波浪产生的孔压累积量并不是在等于上覆土层的自重应力的时候土体才发生液化破坏的,而是小于其上覆自重应力时就发生了破坏。杨少丽^[4]曾在研究黄河水下三角洲埋北海区海底稳定性的过程中,也发现类似的情况,以往的研究表明风暴期间海底沉积物扰动的深度在4米左右,但是她发现该地区的液化影响深度将大于4m甚至大于5m。

究其原因,可能是因为上面的土体(0.8m处以上)已经发生液化时,形成悬液,液化的上覆土体对下层土体的有效应力不产生任何贡献,相当于下层土体(1.6m处)的上覆土层自重应力减少,所以下层土体内的累积孔压未达到液化前的上覆土层自重应力时就发生破坏了。

笔者认为,在液化影响深度内,不管波浪情况如何,只要上覆土层发生了液化破坏,下覆土层都有可能因此受到影响。根据这种情况看,上述第二种传统判别方法就比较保守,因此,在深度范围内可以尝试提出一条类似于土体有效应力的线(图8中的参考线)来修正第二种方法所提供的上覆土体的有效应力线,根据模型试验研究得出的结果可以得出它们之间的系数 k 值, $k=0.759$, 公式如下所示:

$$u_f = k \sigma' = kr \cdot z$$

若计算出的超静孔隙水压力落在有效应力线的左边和参考线的右边,笔者认为此深度上的土体也可能会出现液化,这条参考线可以近似的作为一条液化

参考线，可以认为是第二种传统方法的修正。

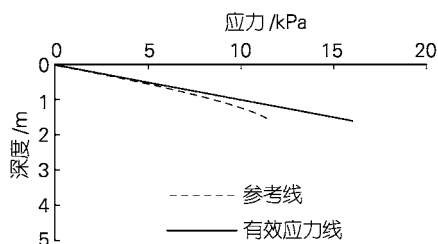


图8 考虑到上覆土层液化所得到的参考线与有效应力线的比较
Fig.8 Comparison between the effective stress line and the reference line in view of liquefaction of the upper soil

3 结论及讨论

在波浪的作用下，由于粉土颗粒间的孔隙较小，粉土海床内的孔隙水来不及排出维持原孔压所需减少的水量，而波浪周期又比较短，由此造成粉土海床孔隙水压力的不断变化直至液化破坏。粉土海床的孔压对波浪的响应值在垂向上沿土层递减，在水深条件、波浪情况相同的条件下，粉土海床内同一深度上的孔压响应值随波高的增大而增加，两次波浪连续作用较间歇作用的粉土内响应的孔压值要更大，土体也

更易破坏。当孔压累积到一定量的时候粉土就发生破坏了，此时的孔压响应值小于上覆土体的自重应力。由此本文尝试着提出了第三种评价方法，即土体内的超静孔隙水压力等于 k 倍 ($k < 1$) 的上覆土体的自重应力时就发生液化破坏，由于室内模型试验比较难取得粉土液化的数据，所以此种方法还有待于进一步完善。

参考文献：

- [1] 冯秀丽.海洋水动力条件下粉土响应模型[D]. 青岛：青岛海洋大学，2000.
- [2] Glen R, Philip J, Peter S. Analytical technique for the interpretation of measured pore pressures in shallow marine sediments. proceedings of the eleventh international offshore and polar engineering conference[M]. Stavange ,Norway:The international Society of Offshore and Polar Engineers,2001.469 - 475.
- [3] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京：清华大学出版社，1994.196 - 197.
- [4] 杨少丽.海底土对波浪等水动力的响应—以老黄和口水下三角洲沉积物为例[D].青岛：青岛海洋大学，1995.

In-situ answering pore pressure under wave and its application to stability analysis of silty seabed

CHEN Jing¹, FENG Xiu-li², LIN Lin²

(1.Resource&Environment College East China Normal University Shanghai 200062 ,China 2.Marine Geosciences College , Ocean University of China , Qingdao 266003 , China)

Received: Dec. , 11 , 2003

Key words: silt ; wave effect ; excess pore pressure ; liquefaction

Abstract : Silt is easy to liquefy under cyclic loading such as wave effect. and excess pore pressure plays an important role in dynamic behavior of silt soil and its change can affect seabed stability directly. The relation between excess pore pressure and wave in silty seabed is studied in this thesis by means of model experiment of answering pore pressure under wave. Besides , the thesis summed up two methods to estimate porepressure under wave and put forward a method to envalue the stability of silty seabed according to the result of the model experiment.

(本文编辑：刘珊珊)