

关于波浪作用下粉土质海床中 共振现象的解释

林 缙

(中国科学院力学研究所环境流体力学研究室, 北京 100080)

摘 要: 本文详细讨论了粉土质海床在波浪作用下所呈现共振现象的力学机制. 利用有限深海床下波浪载荷对土层响应的研究, 系统地比较了理论计算结果和实验结果. 提出了在波浪作用下粉土质土层中存在着一硬土层, 从而引发 Bragg 共振.

关键词: 共振; 粉土; 多孔介质; 孔隙水; 渗透率

中国分类号: O353.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1004 - 2903(1999)04 - 0066 - 09

1 引言

在沿岸工程界, 研究粉土在波浪作用下的特性具有很大的实际意义. 我们知道海底的绝大部分面积是被一些淤泥质粉砂所覆盖, 在波浪作用下, 海底底床中有时会涌出大量泥沙, 这些泥沙在波浪和水流的作用下淤积到港口, 造成航道堵塞. 对座落在海底的一些结构物来说, 如海底输油管道、海底电缆等等, 海底翻沙会造成结构物的失稳. 这些问题追其源头都涉及到海床在波浪的作用下所呈现的应力状态, 以及海底泥沙在什么条件下会出现液化或者说流化现象. 关于海床液化问题, 人们往往侧重于研究砂质海床^[1,2,3]. 由于粉土有其特殊性, 从而使得对粉土土床出现的一些奇异现象的力学机制了解甚少. 从粉土微观结构的研究可知, 粉土中的细小颗粒对粉土土骨架的刚度、土层的孔隙率以及孔隙水的渗透率都起着决定性的作用^[4,5,6]. 美国加州大学 Berkeley 分校的 Foda^[7]和 Tzang^[8]在实验室发现, 在水波作用下, 粉土海床中的孔压在某一深度有时会突然上升, 这时整个土块被抬起, 并且有羽状的沉积物从底床中喷出, 从孔压探头测得的孔隙水压力可以明显地看到有共振现象, 而砂质底床没有这种现象. 为了研究造成此共振现象的力学机制, 我们考虑海洋土的弱非弹性性质以及波浪和海床的相互作用, 从 Biot 的本构关系出发, 参照 Foda 的实验结果, 对有限深粉土质海床对波浪的响应进行分析, 期望从理论上得到了一些有价值的结论.

收稿日期: 1999年5月18日

基金来源: 国家自然科学基金资助项目 (19602021)

为了能更好的了解粉土质海床中出现的共振现象,我们先简单地介绍一下 Foda 的实验.图一是实验用水槽的简易装置图.

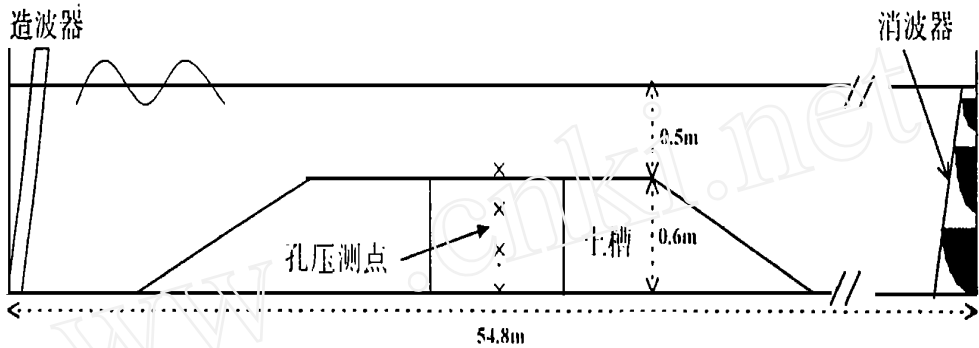


图 1 实验用水槽简易装置图

在 54.8m、长 2.4m 和宽 1.5m 高的水槽中有一高度为 0.6m 的土槽,土槽前坡度为 1:10 以保证波形不变形.土槽中的压力传感器有 2~3 列,呈二维排列,其中一列在水槽中部,有四个垂直分布的压力传感器,其他的布置在土槽壁附近.在土槽中部,除了在土槽的上部和底部 0.508m 处分别安置了两个压力探头外,还在深度为 0.203m、0.356m 安置了两个压力探头.实验中,在不同的波况、不同的固结时间,分别对沙土和粉土土层中的孔隙水压力进行了测量.发现在沙土情况下没有共振现象,而在粉土情况下,有时会出现共振现象,有时却没有,但无论是有共振现象还是无共振现象,孔隙水压力都在平均值之上有一个很明显的增量.也就是说,在波浪作用下在粉土土槽内都会发生一定程度的流化.孔压的净增值主要依赖于粉土所经历的加载历史,经历过共振过程的粉土比没有经历过共振的粉土要“脆弱”的多.为了解释产生共振的力学机制,在该文中我们将选三种比较典型的情况进行分析,具体的波参数和土参数在第三部分介绍.需要注意的是,我们这里讨论的范围仅限于对产生这种共振的力学机制进行分析,不讨论经历共振之后的粉土行为.因此,我们这里所选的这三种情况所用的海洋土都是原状土.

2 控制方程和边界条件

为了能更真实地反映海洋土的性质,我们把海洋土看作弱非弹性多孔介质,它是由固相、液相及气相所组成,其中固相的土颗粒构成了土骨架,液相的海水几乎充满了土的孔隙,还有少量的孔隙被气体占据.采用 Biot 的多孔介质模型,考虑土骨架的变形,孔隙水和土骨架的相对运动以及孔隙水的可压缩性.在平面应力条件下,充液多孔介质的本构关系为:

$$\sigma_{xx} = \tilde{H} e - 2 \tilde{\mu} e_z - \tilde{C}$$

$$\begin{aligned} z_z &= \tilde{H} e - 2 \tilde{\mu} e_z - \tilde{C} \\ z_x &= \tilde{\mu} \\ p &= \tilde{M} - \tilde{C} e \end{aligned}$$

该本构关系的特点就在于,它反映了海洋土应力不仅和土应变有关,而且和孔隙水的可压缩性有关;而孔隙水压力也和土的变形有关,两者是互相耦合的.本文作者在文献[9]详细推导了有限深海底中孔隙水压力、应力以及土骨架和孔隙水位移对线性加载波的响应.我们下面给出一些主要结果.

海洋土与孔隙水运动的基本方程

假设加载波为线性波,水深为 h ,底床是均匀多孔介质.海水部分为不可压、无旋、无粘流体.假设加载波的表面波可以写为: $\tilde{u} = \tilde{u}_0 \exp[i(\tilde{\omega} t - \tilde{k} x)]$, \tilde{u}_0 为波幅, $\tilde{\omega}$ 为加载波频率; g 为重力加速度; $\tilde{k} = k_r + ik_i$ 为复波数,实部 $k_r = \omega / L$,虚部 k_i 表示波的衰减.在小振幅波的假设下,其速度势满足 Laplace 方程,可写为:

$$\tilde{u} = i \tilde{u}_0 g \{ \cosh[\tilde{k}(z-h)] \tilde{V} + \sinh[\tilde{k}(z-h)] \tilde{V} g \tilde{k} \} e^{i(\tilde{\omega} t - \tilde{k} x)}$$

考虑波浪和海洋土相互作用下的理论模型是基于假设土骨架和孔隙水都是可压缩的,孔隙水相对于土骨架的运动满足 Darcy 定律.那么含孔隙水的土骨架以及孔隙水的动量方程分别为:

$$\left. \begin{aligned} r(1 - \nu) \vec{\mu} + \vec{f} \vec{U} &= \vec{\mu} + \vec{f} \vec{U} \\ \vec{f} \vec{U} &= \vec{f} \vec{\mu} + \vec{f} \vec{U} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这里 $\vec{U} = r(1 - \nu) \vec{\mu} + \vec{f} \vec{U}$,我们考虑海洋土土骨架和孔隙水运动的动力学方程,应该在静力学方程基础上增加惯性项.基于 Biot 的本构关系和 Darcy 定律,土骨架和孔隙水所满足的动力学方程为:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{\mu} + \vec{f} \vec{U}) = \tilde{\mu} \nabla^2 \vec{\mu} (\tilde{H} - \tilde{\mu}) \nabla e - \tilde{C} \nabla V / \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\vec{f} \vec{\mu} + m \vec{U}) + \frac{\vec{f}}{k_s \frac{\partial}{\partial t}} = - \nabla p \quad (2)$$

边界条件:

$$\text{在交界面上, } z = 0 \left\{ \begin{aligned} z_z + p &= 0 \\ z_x &= 0 \\ p &= - \vec{f} \theta / \alpha \\ \theta / \alpha &= \alpha u_z / \alpha + \theta_z / \alpha \end{aligned} \right. \quad \text{在槽底, } z = -d \left\{ \begin{aligned} u_x &= 0 \\ u_z &= 0 \\ z &= 0 \end{aligned} \right.$$

土骨架和孔隙水的位移函数:

$$u_x = \{ (-1) e^{-\tilde{k}_r z} - 2 \tilde{k}_i e^{-\tilde{k}_r z} - \tilde{k}_i e^{-\tilde{k}_r z} - 2 \tilde{k}_i e^{-\tilde{k}_r z} \} i \tilde{k} + (-1) e^{-\tilde{k}_r z} + 2 \tilde{k}_i e^{-\tilde{k}_r z} \} e^{i(\tilde{\omega} t - \tilde{k} x)}$$

$$\begin{aligned}
 u_x &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) \tilde{f} + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) \tilde{s} + (-1_T e^{-\tau Z} - 2_T e^{-\tau^2}) \tilde{k} \} e^{i(t-kx)} \\
 x &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) C_f \tilde{k} + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) C_s \tilde{k} + (-1_T e^{-\tau Z} - 2_T e^{-\tau^2}) C_T \tilde{k} \} e^{i(t-kx)} \\
 z &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) C_f \tilde{f} + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) C_s \tilde{s} + (-1_T e^{-\tau Z} - 2_T e^{-\tau^2}) C_T \tilde{k} \} e^{i(t-kx)}
 \end{aligned}$$

孔隙水压力、正应力和切应力:

$$\begin{aligned}
 p &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) [\tilde{C} + \tilde{C}_f \tilde{M}] \tilde{k}_f^2 + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) [\tilde{C} + \tilde{C}_s \tilde{M}] \tilde{k}_s^2 \} e^{i(t-kx)} \\
 x_x &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) [(\tilde{C} + \tilde{C}_f \tilde{M}) \tilde{k}_f^2 + 2\tilde{\mu}_f^2] + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) [(\tilde{C} + \tilde{C}_s \tilde{M}) \tilde{k}_s^2 + 2\tilde{\mu}_s^2] + (-1_T e^{-\tau Z} - 2_T e^{-\tau^2}) 2i\tilde{\mu}_k \tilde{k} \} e^{i(t-kx)} \\
 z_z &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) [(\tilde{C} + \tilde{C}_f \tilde{M}) \tilde{k}_f^2 - 2\tilde{\mu}_k^2] + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) [(\tilde{C} + \tilde{C}_s \tilde{M}) \tilde{k}_s^2 - 2\tilde{\mu}_k^2] + (-1_T e^{-\tau Z} - 2_T e^{-\tau^2}) 2i\tilde{\mu}_k \tilde{k} \} e^{i(t-kx)} \\
 x_z &= \{ (-1_f e^{-jZ} - 2_f e^{-j^2}) 2i\tilde{\mu}_k \tilde{k}_f + (-1_s e^{-sZ} - 2_s e^{-s^2}) 2i\tilde{\mu}_k \tilde{k}_s + (-1_T e^{-\tau Z} - 2_T e^{-\tau^2}) (2\tilde{k}^2 - \tilde{k}_T^2) \tilde{\mu} \} e^{i(t-kx)}
 \end{aligned}$$

由以上得到的公式,我们就可以对海床内部海洋土的应力应变状态进行分析。

3 结果及分析

在这一部分,我们将针对 Foda 的一些实验结果进行讨论。表 1 列出了 Foda 和 Tzang 的实验参数,其中粉土参数在 silt① 和 silt② 之间。我们特选了三种情况:在波况 case① 中,海洋土为粉土,有共振流化现象发生;波况 case② 中海洋土也为粉土,但没有共振流化现象发生;波况 case③ 中海洋土为砂土,此时没有共振流化现象发生。图 2 绘出的是这三种波况下孔隙水压力随时间变化的实验曲线^[7,8]。从图 2(a) 中我们可以很明显地看出在深度为 0.203m、时间 80s 左右孔隙水压力的摆动幅度最大达到 1.4kN/m²,四倍于床面附近的平均值,此时波高和水深之比为 8.3/50。图 2(b) 给出的是第二种波况下孔隙水压力曲线,这时最大孔隙水压力值仅为 0.25kN/m²,此时没有共振现象,需要注意的是第一种波况和第二种波况的不同点,第二种波况的波高和水深之比为 10.2/50。图 2(c) 是针对砂土质海床,可以看出孔隙水压力没有剧烈的增加或减少。根据液化的定义,当土层中的土颗粒在孔

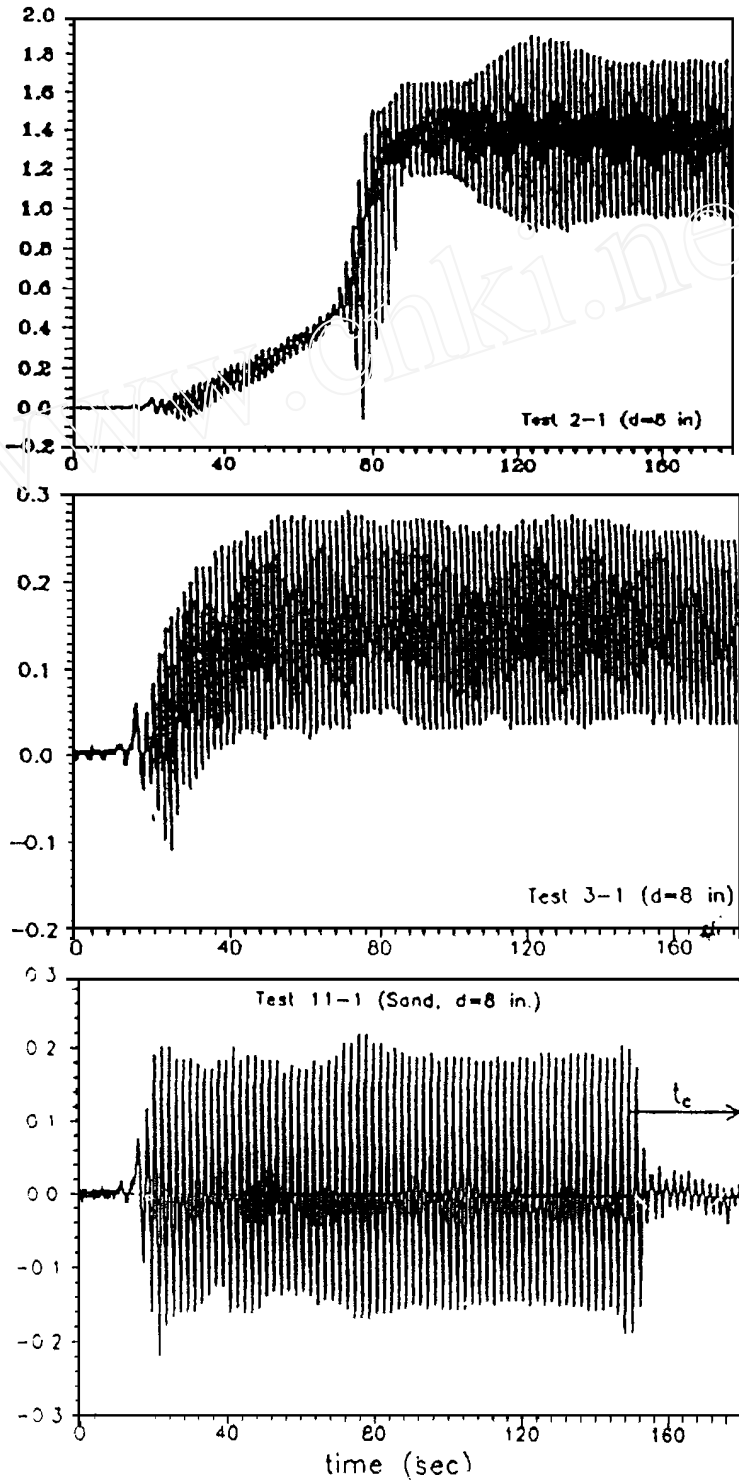


图2 孔隙水压力随时间变化实验曲线

压的支撑下处于悬浮状态,也就是超静水压力随深度变化满足下面公式时,土体就处于液化状态:

$$t = 1 - (i - f)gd$$

由上式可以算出当深度为 0.203m 时,若超静水压力大于 1.539kN/m^2 ,土体液化.由此可知在 case① 情况下,共振时的孔压已接近于液化值,共振之后的孔压足以使该土层液化.而对 case② 的情况,土层处于稳定状态.依照极限平衡原理^[9]计算所得到的液化深度约在 0.05m 附近(图 3),在该深度以下土层是稳定的.也就是说,造成实验中所出现的液化现象,不能按 Morh 理论解释.下面我们从粉土的物理特性来考虑.

表 1 Foda 实验参数

加载波波况

周期	case 1: 1.72s	case 2: 1.70s	case 3: 1.97s
波高	case 1: 8.3cm	case 2: 10.2cm	case 3: 7.5cm

海洋土参数

土参数	砂土	粉土 1	粉土 2
孔隙度	0.4	0.494	0.525
泊松比	0.35	0.49	0.49
剪切模量	$1.0\text{e}+7$	$1.0\text{e}+5$	$1.0\text{e}+6$
渗透系数	$4.\text{e}-8$	$1.\text{e}-11$	$1.\text{e}-11$
孔隙水粘性系数	$1.\text{e}-3$	$1.\text{e}-3$	$1.\text{e}-3$
土骨架附加质量	0.25	0.25	0.25
孔隙水的体积模量	$1.92\text{e}+9$	$1.92\text{e}+9$	$1.92\text{e}+9$
土颗粒的体积模量	$3.6\text{e}+10$	$3.6\text{e}+10$	$3.6\text{e}+10$
孔隙水密度	$1.03\text{e}+3$	$1.03\text{e}+3$	$1.03\text{e}+3$
土颗粒密度	$2.64\text{e}+3$	$2.61\text{e}+3$	$2.61\text{e}+3$
库仑损耗	0.05	0.05	0.05
饱和度	0.99	0.99	0.99

Foda 用一个简单的实验对粉土土层的刚度进行了检测.在实验中,把四个比重为 2.5 的玻璃球,两个比重为 1.14 的高尔夫球安放在床面的不同部位,在海洋土经历了共振和非共振两个阶段后,发现四个玻璃球几乎都在离床面 0.24m 处.两个高尔夫球却只有 1/3 被埋在泥里.这也说明底床的流化深度至少是 0.24m.从刚度测量值来看,经历了共振的粉土土层的上半部分的刚度没有什么变化,土层下半部的渗透阻尼稍许减少,而在土层的中部有一层很明显的硬土层.图 4 是我们利用上一节的理论推导,得到的孔隙水垂向位移随深度变化曲线.从图 4 上也可以明显地看出,在 0.24m 附近孔隙水渗透位移为零.这也从理论上进一步证明了实验中所观测到的硬土层的存在及其深度.

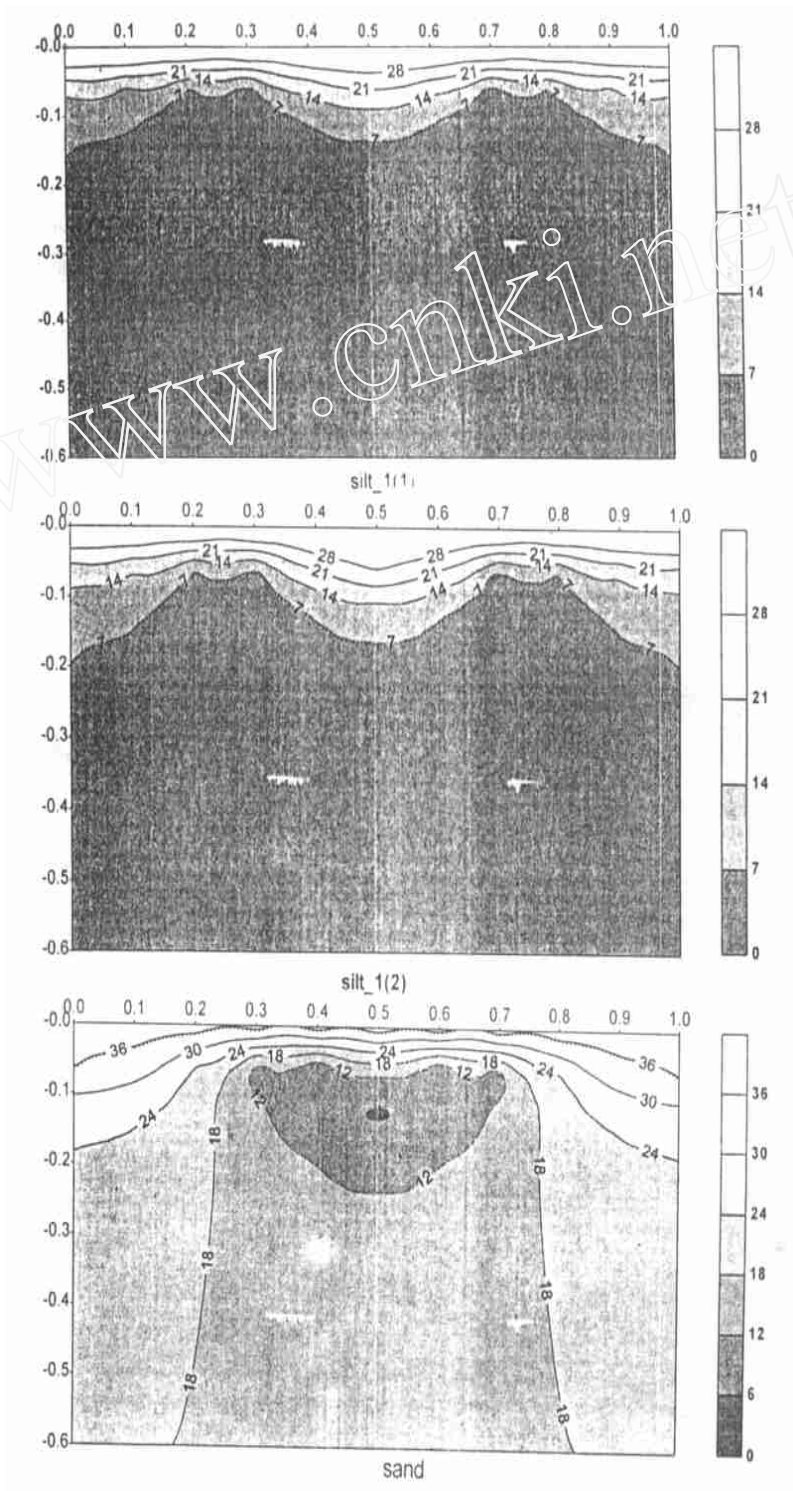


图3 应力角随深度变化曲线

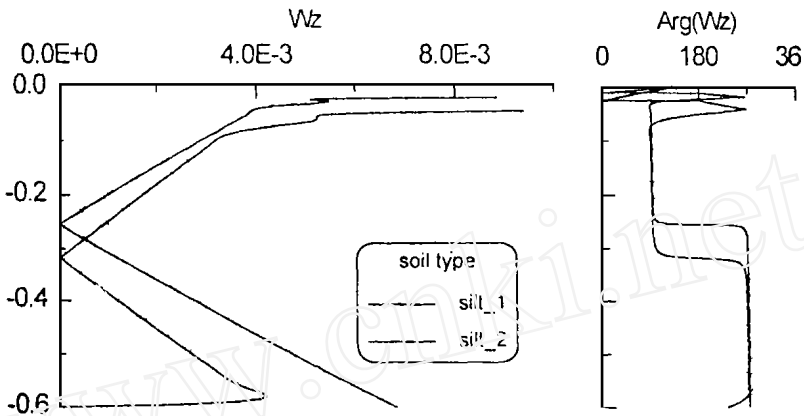


图 4 孔隙水垂向位移随深度变化曲线

由以上实验值和理论计算结果来看,波浪作用下的粉土土层中确实存在一硬土层.为了分析这一硬土层的特点,我们回过头来再来看应力角等值线图(见图 3).根据应力角的定义我们可以判断,在图 3(a)和图 3(b)中土层的硬度是周期变化的,尤其是在在深度 0.2m 处可以清楚地看到这一规律,而且土层硬度的变化周期正好是加载波的两倍.根据 Bragg 共振的特点,我们认为实验中所观测到的共振现象是 Bragg 共振.在图 3(c)土层中没有这种周期变化层,这也和实验中没有在沙土床中发现共振现象吻合.另外我们还注意到,图 3(b)虽然有类似于图 3(a)中的周期变化层,但在 case② 实验中并没有共振现象发生,这可能是由于 case② 中波高的增加,非线性的影响加大,无法满足二次共振的条件.

以往关于共振的力学机制有多种解释, Yamamoto^[10]从理论上分析粘土在波浪作用下会发生共振,其力学机制是在某一频率下,由于土中的剪切波频率和加载波频率相同而发生共振.从我们的计算结果来看, Foda 实验所看到的共振现象并不是这一原因,因为在 case① 情况下加载波频率和应力波频率之比为 0.3^[9]. Foda 在解释自己的实验时认为,波浪的作用使得在土层中存在着许多“通道”,这一共振是由于在粉土土层的强渗流“通道”而引起的,但他的结果并没有对实验中所出现的液化深度作出合理的解释.

参 考 文 献

- [1] Yamamoto, T., et al, On the response of a poro - elastic bed to water waves. J. F. M. (78):193 ~ 206.
- [2] Jeng, D. S., Wave - induced soil response in a nearly saturated sea - bed of finite thickness. Geotechnique, (96) 46, No. 3:427 ~ 440.
- [3] Tsai, C. P., Wave - induced liquefaction potential in a porous seabed in front of a breakwater. Ocean Engng. (94) 22, No. 1:1 ~ 18.
- [4] Bennett, R. H., In situ porosity and permeability of selected carbonate sediment: Great Bahama 1: Measurements. Marine Geotechnology. (90)9:1 ~ 28.
- [5] Goddard, J. D., Nonlinear elasticity and pressure dependent wave speeds in granular media. Proc. R. Soc.

Lond. ,90(A) :430:105 ~ 131.

- [6] Mitchell J. K. ,Fundamentals of soil behavior. 2nd. ed. John Wiley & Sons ,New York.
- [7] Foda ,M. A. ,Resonant fluidization of silty soil by water waves. J. G. R. (94)99 ,No. C10:20264 ~ 20475.
- [8] Tzang ,S. , - Y. , Water wave - induced soil fluidization in a cohesionless fine - grained ,Ph. D. dissertation , Dep. of Civil Eng. ,Univ. of Calif. ,Berkeley ,1992.
- [9] 林緬、李家春 ,波浪作用下的土特性分析 ,应用力学与数学 ,(待发表).
- [10] Yamamoto ,T. ,et al ,Experiments and theory of wave - soil interaction J. Engng. Mech. (84) :110 ,No. 1 : 95 ~ 112.

文中符号定义

$\vec{U}_{U_x, U_z}, \vec{u}_{u_x, u_z}$	孔隙水位移和土骨架位移;
$= - V \cdot \vec{\epsilon}; (\vec{\epsilon} = (\vec{U} - \vec{u}))$	为孔隙率;
$p, \sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$	孔隙水压力;土中总应力;
$e = e_x + e_z (e_x = \partial u_x / \partial x, e_z = \partial u_z / \partial z)$	体积应变;
$= \partial u_z / \partial x + \partial u_x / \partial z$	切应变;
$\bar{H}, \bar{\mu}, \bar{C}, \bar{M}$	Biot 复弹性模量;
r, f	土颗粒密度和孔隙水密度;
f	孔隙水粘度
k_s	渗透系数

ON RESONANT EVENTS OF SILT SOIL BED BY WATER WAVES

Lin Mian

(Institute of Mechanics ,CAS ,Beijing 100080)

Abstract

A detailed discuss for the mechanism of wave - induced resonant events in silt bed is given in this paper. Appliing the theory of soil response to water wave at finite daphth ,both numerical results and experiment data are compared. It is proposed that there is a stiff layer in the silt soil , which may cause Bragg resonance.

Key words :Resonance ;Silt ;Porous media ;Poros water ;Permeability

Manuscript received by editor August 29 ,1997

Project 19602021 supported by NSFC

