

波浪和海底底床的相互作用(1) —不同模型下的波浪衰减分析

林 緬

(中国科学院力学研究所工程科学部,北京 100080)

摘 要:分析了造成波浪衰减几种力学机制,并针对不同模型海底底床下的波浪衰减,以及有限深底床和无限深底床的波浪衰减进行了计算比较,认为造成波浪衰减的力学机制直接和底床砂质的性质相关.

关键词:波浪衰减;海底底床;库仑摩擦

中图分类号:P315

文献标识码:A

文章编号:1004-2903(2001)03-0047-06

1 引 言

我们知道,波浪和底床的相互作用可以从以下两个方面表现出来:a、波浪衰减;b、底床中应力场变化.波浪衰减反映着由于土床的渗流、床面上的粘性流动以及土床的变形而带来的波能量损失.本文中我们将就波浪衰减问题进行分析.

在水波理论研究中,假定底床床面是刚性不透水的水平光滑底 1 ,波浪传播时,由于水粘性 ν 的存在,固壁上形成一厚度为 $O(\sqrt{\nu/\omega})$ 边界层,从而使得波浪衰减.然而波浪在真实底床上传播时,导致波浪衰减的原因就不仅仅是水的粘性了,一般来说还应该考虑底床的渗流性以及土层内土颗粒间的库仑摩擦等因素所带来的影响.下面我们比较在不同底质海床上的波浪衰减率.

2 库仑摩擦

假设加载波为小振幅波,海水为不可压、无旋、无粘流体.底床为弱非弹性多孔介质,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,它以透镜体形式包围于土颗粒之间的接触点,还有少量气体存在于内部的孔隙信道上.当波浪在海床上传播时,土层中孔隙水压力产生梯度,使得孔隙水和气体相对于土骨架运动,同时把动量传输给土骨架,使得土骨架变形.大量的实验已经证实海洋土可当作粘弹

收稿日期:2001-03-30;修订日期:2001-06-30.

基金来源:国家自然科学基金项目(19602021).

作者简介:林緬,女,1960年生,江苏人,2000年毕业于中国科学院力学研究所,获博士学位,现为中国科学院力学研究所副研究员,主要从事海岸与海洋工程领域的研究.

性体,利用 Kryloff 和 Bogoliuboff(1949)^[1]方法把由库仑摩擦带来的弱非线性项线性化,代入 Biot(1962)^[2]的线性理论中,此时所有弹性模量 $\tilde{H}, \tilde{C}, \tilde{M}, \tilde{\mu}$ 均为复数(在本文中所有带上“~”线的均为复数),这些复弹性模量考虑了在每一次波浪循环载荷下所带来的能量损失。比如,复剪切模量 $\tilde{\mu} = \mu_r + i\mu_i$,其实数部分为土骨架的动力学剪切模量 G ,虚数部分为由土颗粒与土颗粒摩擦而形成的非线性库仑衰减的线性化表示。我们用损失比 $\Delta w/w$ 来定义内部摩擦所带来的能量衰减, Δw 为一次应力循环下土体的能量损失, w 为应变达到最大时存储在土体中的弹性能量。那么循环剪切下的能量损失比可表示为 $(\Delta w/w)_s = 2\pi\mu_i/G$,所以

$$\tilde{\mu} = G \left(1 + i \frac{1}{2\pi} (\Delta w/w)_s \right). \quad (1)$$

同样,土骨架的复体积模量 \tilde{K}_s 也为两部分组成,实数部分为体积模量,虚数部分与循环压缩下土骨架的损失比 $(\Delta w/w)_c$ 成正比:

$$\tilde{K}_s = K_s \left(1 + i \frac{1}{2\pi} (\Delta w/w)_c \right). \quad (2)$$

我们注意到, $K_s = \left(\frac{2\nu}{1-2\nu} + \frac{2}{3} \right) G$, 式中 ν 为泊松比,在循环载荷下始终为实数。所以能量损失比为

$$\delta = \frac{1}{2\pi} (\Delta w/w)_s = \frac{1}{2\pi} (\Delta w/w)_c. \quad (3)$$

其它的复弹性模量都可以用 $\tilde{\mu}, \tilde{K}_s, \delta$ 三个物理量表示出来。从波能量的损失角度考虑波浪衰减。假设波浪在水平底床上沿 x 方向传播,能量守恒方程为: $C_g \frac{\partial E}{\partial x} = -E_d$, (C_g 为群速度, E_d 为一个周期内平均能量损耗率)。若假设波高以指数形式衰减,则: $H = H_0 e^{Dx}$, ($D \leq 0$)。总平均能量可写成: $E = \frac{1}{8} H_0^2 e^{2Dx} \rho g$, 这里 D 就是衰减系数。利用 $E_d = \Delta \bar{W}/T$, $C_g = nC$, 由上两式可以得到衰减系数的表达式

$$D = \frac{1}{2C_g} \frac{E_d}{E} = -\frac{k}{4\pi} \frac{C}{C_g} \frac{\Delta \bar{W}}{E} = -\frac{k}{4\pi} \frac{1}{n} \frac{\Delta \bar{W}}{E}. \quad (4)$$

式中 $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh(2k_0 h)} \right)$ 。

由土颗粒与土颗粒之间的库仑摩擦所造成的波衰减,可以采用 Yamamoto(1978)^[3]的多孔弹性介质模型,该模型假设底床为半无限的均匀的,并且底床对波浪的响应是准静态的,衰减系数为

$$D_{c1} = -\frac{\rho g \delta}{4nG \cosh^2 k_0 h}. \quad (5)$$

当底床运动时,库仑摩擦所造成的衰减为

$$D_{c2} = -\frac{\rho g \delta}{4nG \cosh^2 k_0 h} \frac{1}{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + \delta^2}. \quad (6)$$

当波浪在有限深底床上传播时色散关系为^[4]

$$ih(\tilde{k}h) = \frac{\omega^2}{g\tilde{k}} \left[1 - \frac{w_z(0) + u_z(0)}{a_0 \cosh \tilde{k}h} \right]. \quad (7)$$

波数可以写为

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= k_0 + \Delta\tilde{k} = k_0 - \frac{k_0}{2n} \frac{\tilde{u}_z(0) + \tilde{w}_z(0)}{a_0 \cosh(k_0h)} \\ &= k_0 - \frac{k_0}{2n} \frac{1}{a_0 \cosh(k_0h)} (Re[\tilde{u}_z(0) + \tilde{w}_z(0)] + Im[\tilde{u}_z(0) + \tilde{w}_z(0)]). \end{aligned} \quad (8)$$

我们注意到, $Im(\tilde{u}_z(0))$ 就是库仑摩擦所带来的波衰减, $Im(\tilde{w}_z(0))$ 是底床渗透对波衰减的影响. 具体 \tilde{u}_z, \tilde{w}_z 的表达式可参照文献[4].

3 底床渗透

Putnam(1945)^[5]、Reid 和 Kajiura(1957)^[6]把底床看成是多孔刚性体,考虑由于不可压海水的渗透所造成能量损失,用衰减系数表示为

$$D_{p1} = - \frac{2\rho k_s \omega k_0}{\eta_f [2k_0h + \sinh 2k_0h]}. \quad (9)$$

Yamamoto(1985)^[7]进一步把上式推广到多孔弹性体

$$D_{p2} = - \lambda \frac{2\rho k_s \omega k_0}{\eta_f [2k_0h + \sinh 2k_0h]}. \quad (10)$$

$$\text{这里, } \lambda = \frac{\rho - \rho_f}{\rho + m - 2\rho_f} + \frac{\rho_f [1 - (\omega/\omega_0)^2]}{\rho \{ [1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + \delta^2 \}}, \quad \omega_0^2 = \frac{2Gk_0^2}{\rho}.$$

4 层流边界

Liu(1973)^[8]在流体和砂质界面附近引入层流边界层,估计了不连续的水平速度,提出了多孔介质和层流边界层的衰减系数为

$$D_l = - \frac{2k_0}{2k_0h + \sinh(2k_0h)} \left(\frac{\rho_f \omega k_s}{\eta_f} + k_0 \sqrt{\frac{\eta_f}{2\omega\rho_f}} \right) = D_{p1} + D_{l1}. \quad (11)$$

上式括号中第一项为渗流的贡献,第二项为层流边界层的影响.

为了更好地了解在不同土质的底床下波浪衰减系数的变化情况,我们选择三种海洋土:粗砂、粉砂、淤泥(土参数见表1).在图1a、1b、1c中比较了这三种土质的渗流、层流、库仑摩擦引起的衰减系数 $k_i h$ 随水深 $k_0 h$ 的变化.从这三幅图可以看出,在渗流和层流情形下衰减率均随着水深的减少而增大,考虑库仑摩擦时,某一水深下衰减率达到极值.在有限水深 $0.2 < k_0 h < 5.0$,粗砂底床, $D_{p1} > D_{l1}$, $D_{p1} > D_{c1}$,渗透所带来的波浪衰减最大,库仑摩擦对衰减率的影响比较小,粉砂和淤泥质底床, $D_{p1} < D_{l1}$, $D_{p1} < D_{c1}$ 库仑摩擦的影响最大,渗透的影响非常小.由此我们认为有限水深下,波浪在粉砂(或细砂)和淤泥质底床上传播时,土床内的库仑摩擦是导致波衰减的主要因素.特别是当 $k_0 h \sim 1.0$ 附近时,波衰减尤为明显.

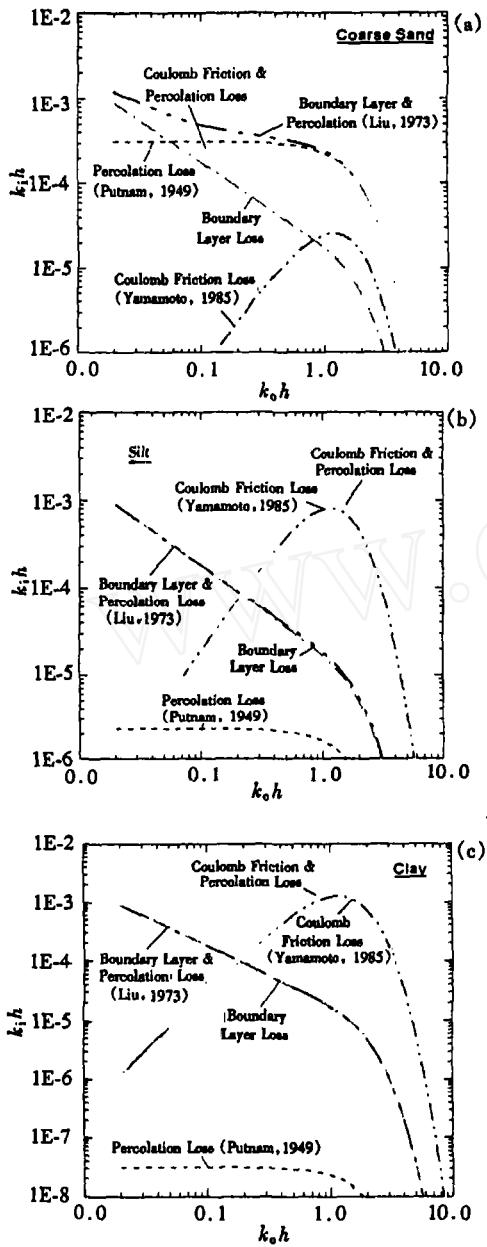


图1 波浪衰减系数随水深变化

Fig.1 Variation of wave decay coefficient with depth of water

(a)粗砂底床;(b)粉砂底床;(c)淤泥质底床

另外我们还比较了有限深和无限深土床模型衰减率随无量纲水深的变化(图2a).在粗砂底床两种模型的结果相差不多,细砂和淤泥质底床两模型结果相差最大能达到一个量级,水深变浅时相差减少,随着底床厚度的增加两模型结果接近(图2b).

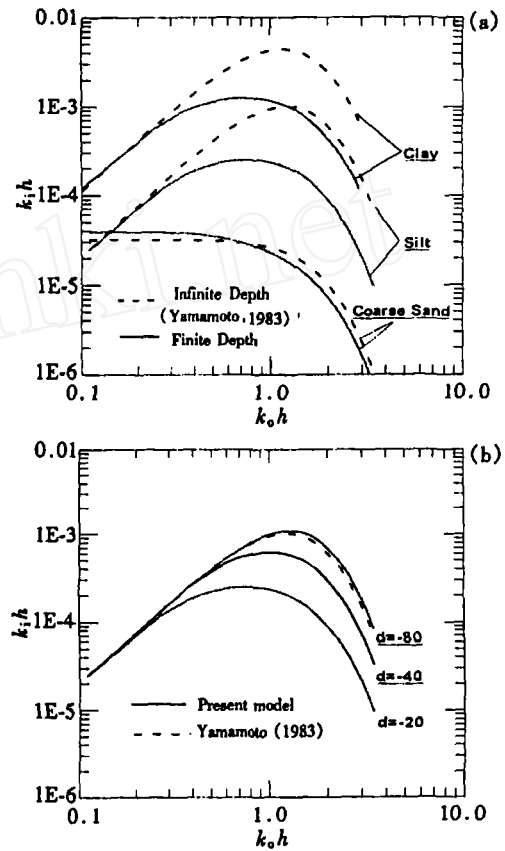


图2 比较衰减率随底床深度

Fig.2 Comparison of decayrate with depth of seabed

表 1 海洋土参数
Tabel 1 Parameters of ocean soil

参数名称	粗砂	粉土	淤泥
孔隙度 β	0.4	0.4	0.4
泊松比 ν	0.33	0.33	0.45
剪切模量 $G(N/m^2)$	5.0×10^7	1.6×10^6	10^6
渗透系数 $K_s(cm/s)$	10^{-2}	7.3×10^{-5}	10^{-6}
孔隙水粘性系数 $\eta_r(kg/ms)$	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
土骨架附加质量 α	0.25	0.25	0.25
孔隙水的体积模量 $K_f(N/m)$	1.92×10^9	1.92×10^9	1.92×10^9
土颗粒的体积模量 $K_r(N/m)$	3.6×10^{10}	3.6×10^{10}	3.6×10^{10}
孔隙水密度 $\rho_f(kg/m^3)$	1.0×10^3	1.0×10^3	1.0×10^3
土颗粒密度 $\rho_r(kg/m^3)$	2.65×10^3	2.65×10^3	2.65×10^3
库仑损耗 δ	0.05	0.05	0.05

5 结 论

从以上计算结果我们得到:波衰减在粗砂底床以渗透为主,且衰减系数和底床厚度无关;细砂(粉土或淤泥)则以库仑摩擦为主,衰减系数的大小依赖于底床厚度.总之,粗砂土床和细砂土床(乃至粉土、淤泥质土床)对波浪的响应有着根本的区别,在海洋工程设计的安全分析中,要特别注意这些参量的选取.

参 考 文 献

- [1] Kryloff N, Bogoliuboff. Introduction to Nonlinear Mechanics[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1947, 55 ~ 63.
- [2] Biot M A. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media[J]. Journal of Applied Physics, 1960, 33: 1482 ~ 1498.
- [3] Yamamoto T, et al. On the Response of a Poro-Elastic Bed to Water Waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 1: 193 ~ 206.
- [4] 林緬. 波浪作用下粉土特性分析[J]. 中国科学(E), 2001, 31(1): 86 ~ 96.
- [5] Putnam J A. Loss of Wave Energy Due to Percolation in a Permeable Bottom[J]. Transactions, 1949, 30(3): 349 ~ 356.
- [6] Reid & Kajiure. On the Damping of Gravity Waves over Permeable Seabed[J]. Transactions, 1957, 38: 67 ~ 75.
- [7] Yamamoto T, et al. Wave Damping by Soil Motion[J]. J Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering, 1985, .111: 62 ~ 77.
- [8] Liu P, L-F. Damping of Waves over Porous Bed[J]. J. Hydraul. Div. A. S. C. E. 1973, 99: 2263 ~ 2271.

INTERACTION OF WATER WAVES AND SEABED (1) —ANALYSIS OF WAVES DAMPING FOR DIFFERENT MODELS

LIN Mian

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: The several mechanisms of wave damping are treated analytically on the different models, and compared finite depth seabed with infinite depth seabed as well. It is found that the mechanism is related to properties of soil directly.

Keywords: Wave damping; Seabed; Coulomb-damping

www.cnki.net