

连云港淤泥质海床上波浪衰减研究*—— 实验、观测及理论模型比较和评价

呼和敦德 周显初 李家春 黄振华 林 编 王剑峰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

金 铎 张袁备

(连云港建港指挥部, 连云港 222042)

摘要 本文对连云港淤泥质海床波浪衰减问题通过室内实验、现场观测和理论模拟进行了综合研究, 重点介绍了四种典型理论模型(粘性模型、粘弹性模型、宾汉模型及多孔介质模型), 并通过与实验和现场观测结果的全面综合比较, 对这些理论模型用于研究连云港地区波浪衰减规律的适用性进行了分析讨论。本文最后指出, 针对连云港实际情况今后需要着重研究和发展波浪与淤泥底相互作用的非线性理论模型。

关键词 淤泥质 海床 波浪衰减 理论模型

1 前言

波浪与淤泥质海床相互作用问题的研究对海洋工程、海洋环境及海洋地质等具有重要的理论和实际意义, 波浪经淤泥床迅速衰减的现象是波浪与淤泥海床相互作用重要结果之一, 是当今海洋工程界普遍关注的一项重要研究课题。迄今, 国内外的研究已建立了各种理论模型并进行了一定的室内实验研究和少数的现场观测。这些理论模型主要区别在于对淤泥本构关系的不同考虑, 即考虑了不同的消波机制。可归纳为以下几类: 1. 粘性流体模型, 该模型将软淤泥底上波浪的衰减问题简化为波浪在两层流体中的传播问题, 上层流体作为理想流体, 下层软淤泥则当作粘性流体处理(Gade^[1], 1958)。Dalrymple 和 liu^[2]把该模型推广到二层粘性流体的情况, 并简化为二层理想流体加上三个边界层模型。Gade 用高粘度糖水溶液为介质所做的实验与理论计算结果比较一致。2. 粘弹性模型(Macpherson,^[3]Hsiao 和 shemdin^[4]1989), 该模型将下层淤泥作为粘弹性体, 上层流体仍为理想流体, 若采用简单的 Voigt 线性模型, 其应力为弹性和粘性两部份之和, 忽略了弹性应力则自动退化为粘性模

* 本课题是由国家自然科学基金资助

型。Mallard 和 Dalrymple 曾研究过纯弹性淤泥情况,发现在此情况下波浪不衰减。3. 宾汉塑性体模型(Mei 和 Liu^[5], 赵子丹等^[6]1987),这是非线性模型,最接近于实际海洋淤泥的本构关系,将下层淤泥作为宾汉流体处理,结果能反映波浪与淤泥相互作用的非线性效应。上述理论模型都将海洋淤泥作为单相介质处理,因此一般情况下这些模型适合于浮淤或软淤泥情况。4. 对于高容重海洋淤泥,它实际上是由固相、液相和气相构成,在这种情况下,淤泥层中由于渗滤和固体颗粒间摩擦引起的损耗占有相当分量,对此,Yamamoto^[7-8]等(1978~1983),提出了多孔介质模型,并配合理论分析开展了相应的实验研究^[9]。上述这些理论有的同个别的实验相符合,但由于自然界各地淤泥成份的差异,土结构的复杂性,本构关系的不同,对上述这些理论尚未进行综合评价,模型的适用范围也有待验证。正如文献^[10]提出,当淤泥容重高达 $\rho_m = 1370\text{kg/m}^3$,实验给出的波高衰减系数比理论结果^[2]高一倍之多。

鉴于上述情况,作者对连云港淤泥质海床波浪衰减问题从室内实验、现场观测和理论模拟三方面进行了综合研究。首先研究了连云港淤泥的本构关系和弹性模量。在此基础上开展了实验研究,并对上述四种典型类型理论模型结合连云港实际情况进行了研究和改进,通过与实验和现场观测结果的综合系统比较对这些理论模型用于研究连云港地区波浪衰减问题的适用性及存在问题进行了分析和评价。

本文重点介绍了对各种理论模型比较和评价,有关波浪与淤泥床相互作用机制的研究内容详见文献[12]和[17]。

2 实验研究

实验在二维波-泥沙水槽中进行(图1),槽长18m,宽0.5m,高0.6m。槽中部布置淤泥床实验段为 $8.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.115\text{m}$,槽两端备有斜坡消波装置,消波性能良好。例如,当水深为30.9cm,泥层厚11.5cm,波周期为1s时,波的反射系数约为8%以下,波浪用电容式波高仪测量。在进行波浪沿程衰减实验中,每隔0.5m采集一个信号,信号经A/D变换,微机采集和处理。实验用的淤泥取自连云港西墅海域,用清水配制为三种容重, $\rho_m = 1.26 \sim 1.48\text{kg/m}^3$ 。在进行波浪衰减实验之前对不同含水量淤泥样品的流变特性和弹性模量做了系统的实验研究^[11],结果表明连云港淤泥在低应变率($\dot{\gamma}$)条件下表现为宾汉特性(图2),其应力应变关系为:

$$\tau = \tau_b \text{sgn} \frac{\partial u}{\partial y} + \mu_b \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$



图1 实验设备示意图

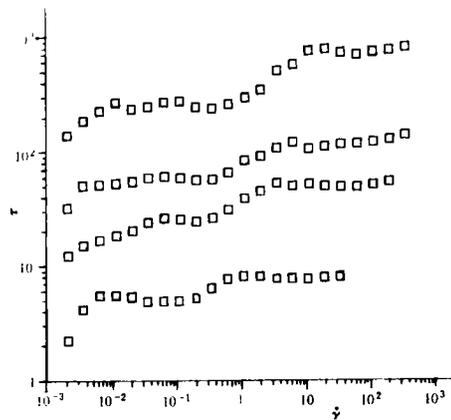


图2 连云港淤泥流变曲线

基于淤泥特性多次实验结果,作者在文[11]中给出淤泥屈服应力 τ_B ,宾汉粘性系数 μ_B 作为淤泥体积容量 C_v 的近似关系

$$\tau_B = 0.4997e^{16 \cdot 46C_v} \quad (2)$$

$$\mu_B = 0.0167e^{20 \cdot 48C_v}$$

其中 τ_B 的单位为 Pa, μ_B 单位为 Pa·s。实验同时给出淤泥表观粘性系数 $\eta_a = \tau_B/\dot{\gamma} + \mu_B$ 作为应变率 $\dot{\gamma}$ 和含水量 W 的关系

$$\eta_a = 8.499 \cdot 10^{10} W^{-3.6045} (\dot{\gamma})^{0.8924} \quad (3)$$

以及淤泥的弹性模量的表达式:

$$G = 8.46 \cdot 10^{16} W^{-6.83} \quad (4)$$

弹性模量 G 的单位为 Pa。

波浪衰减实验在以下参数条件下进行:水深 $h_1 = 12.5 \sim 30.5$ cm,泥层厚 $h_2 = 10 \sim 11.5$ cm,入射波幅 $2A_0 = 2.0 \sim 7.0$ cm,波周期 $T = 0.8 \sim 1.5$ s,淤泥容重 $\rho_m = 1260 \sim 1480$ kg/m³。高容重的选择是考虑连云港淤泥床的实际情况。本实验研究了入射波幅,波周期,水深,淤泥容重等参量对波浪衰减的影响。实验发现入射波高影响波浪衰减规律。在高容重情况下,波衰减系数随入射波增高而增大。随容重的减小会出现相反变化的趋势,在低容重情况下,入射波高的影响变为很小^[12]。

3 理论模型

下面给出的理论模型是作者对现有几种典型理论模型进一步研究和改进的结果,并用模拟了连云港地区波浪衰减问题。

3.1 粘性及粘弹性模型

这里将粘性和粘弹性两种情况作为一个整体考虑,因为忽略弹性影响时,粘弹性模型自动退化为粘性模型,我们考虑两种模型。

第一种模型:将上层当作理想流体,下层为粘弹性体,在上层引入速度势,在下层忽略惯性项中的非线性项,引入流函数,分别满足各层的边界条件及如下的界面条件:切向应力连续且为零,法向应力连续,法向速度连续且等于界面法向速度。最后上述问题的解可归结为求下列色散方程的解:

$$\Omega[(1-r)\left(\frac{gk}{\sigma^2} \text{th}kh_1 - 1\right) - r\left(1 - \frac{\sigma^2}{gk} \text{th}kh_1\right)] = \text{th}kh_1 - \frac{\sigma^2}{gk} \quad (5)$$

其中

$$\Omega = \frac{k}{\Lambda} (m^2 - k^2)^2 (4kch_2sh_2shmh_2 - 4mch_2sh_2shkh_2) \quad (6)$$

$$\Lambda = 4k(m^2 + k^2)^2 (ksh_2sh_2shkh_2 - mch_2ch_2shmh_2) + 16k^4 m (msh_2sh_2shmh_2 - kch_2ch_2shkh_2) + 16k^3 m (m^2 + k^2) \quad (7)$$

$$r = \rho_1/\rho_2 \quad m = k^2 - \frac{i\sigma}{\nu_r}$$

h_1, h_2 分别为上下层流体的深度, k 为波数, $m = k^2 - \frac{i\sigma}{\nu}$, σ 为圆频率, $\nu_r = \nu + \frac{iG}{\rho\sigma}$, ρ_i 为第 i 层流体的密度, G 为剪切模量, ν 为运动粘性系数, g 为重力加速度。

当下层流体很薄或密度很大, 或很粘很硬与刚体相差无几时, 色散关系(5)变为上层水波的色散关系; 当下层流体的粘弹性很小时, 色散关系(5)退化为二层理想流体的色散关系。

一般情况下, 波浪衰减系数很小, 所以

$$k = k_0 + k_1 = k_0 + k_{1r} + ik_1 \quad (8)$$

在 $|k^2\nu_r/\sigma| \ll 1$ 或 $\gg 1$ 的情况下, 色散关系(5)的零阶解 k_0 为实数, k_1 为 k_0 的复数修正量, 而 $e^{-k_1 z}$ 即为波浪衰减因子。在文献[13]中, 我们给出了某些情况下 k_1 的近似解析表达式。从而避免了数值求解复数超越方程的困难, 给工程师提供了方便。经数值计算检验, 这些近似解析表达式的近似程度很不错。

第二种模型: 考虑了上层流体的小粘性情况, 以理想流体加一个边界层来代替上层流体。设 U 为边界层中水平速度的修正量, 则 U 满足方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nu_1 \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (9)$$

其边界条件为 $y \rightarrow \infty$ 时 $U=0$, 界面上切向速度连续, 切向应力连续。最后可得比(5)式复杂得多的色散关系式(见参考文献[15])。

作者用上述二种模型分别计算了 Gade 的实验及另二个实例, 两种模型的结果几乎完全一样。这表明, 当上层流体的粘性较小时(如水, 煤油等), 把它当作理想流体处理是可以的, 几乎没有误差, 但在数学处理上却可以带来很大的方便。

3.2 宾汉模型

在粘弹性和多孔介质理论模型中关于淤泥流变特性采用了线性的本构关系。实际上海洋淤泥一般为非牛顿流体, 在波浪周期载荷作用下具有非线性本构关系(方程(1))。

宾汉模型将上层水体作为理想流体, 底层淤泥作为宾汉流体, 针对高容重淤泥床, 忽略界面混合作用, 上层考虑小振幅长波, 并设 kh_1 及 A/h_1 为小量。底层宾汉流体有两种不同特征的流态区: 剪切流和栓塞流, 两区界面纵向坐标 y_0 是未知函数。这是非线性本构关系在数学处理上带来的困难, 通过忽略界面剪切力对上层水流的局部影响, 克服了求解 y_0 的困难^[5]。当假设一个抛物型剪切层速度剖面, 通过积分淤泥运动方程, 给出求解 y_0 和栓塞流速 u_p 的方程

$$\bar{u}_p \frac{d\bar{y}_0}{d\sigma} + \left(\frac{6}{\sigma} \frac{dU}{d\sigma} - 4 \frac{d\bar{u}_p}{d\sigma} \right) \bar{y}_0^2 = 12\bar{u}_p \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{u}_p}{d\sigma} = \frac{1}{S} \frac{dU}{d\sigma} - \alpha \operatorname{sgn} \bar{u}_p \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad \sigma = \bar{t} - \bar{x}, \quad \alpha = \frac{\tau_B/h_2}{\rho_2 \omega AC/h_1}, \quad S = \rho_2/\rho_1$$

$$\bar{x} = kx, \quad \bar{t} = \omega t, \quad \bar{y} = (y + h_2)/\delta_m \quad (12)$$

$$(\bar{U}, \bar{u}_p, u_b) = (C/gA)(U, u_p, u_b)$$

A 为波幅, ω 为圆频率, C 为波速, U 为清水层深度积分速度, δ_m 为剪切层厚度, 下标“ b ”和“ p ”分别表示剪切层和栓塞流区。参数 α 表示屈服应力与作用在淤泥层上的外压力梯度之比。式(11)表明淤泥层栓塞流动只依赖于参数 αs , 因此, 存在一个临界 $(\alpha s)_c$ 值决定泥的运动形式, 对正弦水波 $(\alpha s)_c = 0.537$ 。当 $\alpha s \leq 0.537$, 淤泥运动是连续的, 如果 $1 > \alpha s > 0.537$, 淤泥的运动是回隙的。泥层的不同运动形式影响上层波能的损耗。根据波能通量净变化率与总耗损能的平衡关系得到求解波高沿程衰减的常微分方程。

$$\frac{d}{d\tilde{x}} (\tilde{A}^2 \tilde{h}_1^{1/2}) = - \frac{2}{\pi s} \frac{h_2}{h_{10}} \frac{\tilde{A}^2}{\tilde{h}_1} (F_1 + \frac{1}{2} \frac{A_0}{h_2} \frac{fS}{k_0 h_{10}} \frac{\tilde{A}}{\sqrt{\tilde{h}_1}} F_2 + \frac{\delta_m}{h_2} F_3) \quad (13)$$

其中 $\tilde{x} = k_0 x$, $\tilde{A} = A/A_0$, $\tilde{h}_1 = h_1/h_{10}$

下标“0”表示起始点位置, f 为界面摩阻系数, S 为海床坡度, F_1, F_2 和 F_3 是 αs 的函数, 分别代表泥层屈服应力, 界面剪切力和淤泥宾汉粘性应力对波衰减的贡献。栓塞流体现了泥层中库伦摩擦的效应。因此, 宾汉模型较好的反映了淤泥床上波浪衰减的实际物理机制。

3.3 多孔介质模型

海洋土是由固相、液相和气相构成, 其中固体颗粒构成了土骨架, 液相海水几乎充满了土的孔隙, 而气相在孔隙中只占极小份额, 所以, 多孔介质模型真正反映了海洋土的真实面貌, 另一方面, 由于采用了 Biot 的本构模型⁽¹⁸⁾, 改进了以往多孔介质模型的不足, 可以同时考虑土骨架变形, 孔隙水流与可压缩性, 该本构模型为:

$$\begin{cases} \tau_{xx} = \bar{H}e - 2\bar{\mu}e_x - \bar{C}\zeta \\ \tau_{zz} = \bar{H}e - 2\bar{\mu}e_z - \bar{C}\zeta \\ \tau_{xz} = \bar{\mu}\gamma \\ p = \bar{M}\zeta - \bar{C}e \end{cases} \quad (14)$$

其中 τ_{ij} 为海洋土中的应力分量, e_i 为应变分量, $e = e_x + e_z$ 为体积变形, γ 为切应变, ζ 为孔隙水相对位移的散度, $\bar{H}, \bar{\mu}, \bar{C}, \bar{M}$ 为 Biot 弹性模量。该本构关系的特点是: 海洋土应力分量与孔隙水压缩性的耦合, 同时因存在库伦摩擦而有能量损耗, 该损耗机制反映在 Biot 弹性模量为复数, 它与剪切与压缩循环过程中的比能量损失 $\delta = \frac{1}{2\pi} (\frac{\Delta w}{w})$ 有关。

海洋土在海浪引起的周期性载荷作用下会产生三类应力波, 即土架压缩波, 孔隙水压缩波与土架剪切波, 它们的线性迭加应在海水与海洋土界面上满足法向速度, 法向有效应力, 剪切应力与孔隙水压连续的条件, 从而导出色散关系与波浪衰减系数的表达式:

$$\text{th} \bar{k}h = \frac{\omega^2}{\bar{k}g} \frac{(1 - \frac{\bar{k}g}{\omega^2} F)}{(1 - \frac{\omega^2}{\bar{k}g})} \quad (15)$$

* 文献(5)中公式(115)有错

其中:

$$\bar{F} = \frac{\rho_f \omega^2 \{2\bar{k}^2 [\bar{\lambda}_1 (\bar{c}_1 - \bar{c}_3) + \bar{\lambda}_2 \bar{E} (\bar{c}_2 - \bar{c}_3)] - \bar{S}_3^2 [\bar{\lambda}_1 (1 + \bar{c}_1) + \bar{\lambda}_2 \bar{E} (1 + \bar{c}_2)]\}}{\bar{k} (2\bar{k}^2 - \bar{s}_3^2) [\bar{s}_1^2 (\bar{c} + \bar{c}_1 \bar{M}) + \bar{s}_2^2 \bar{E} (\bar{c} + \bar{c}_2 \bar{M})]} \quad (16)$$

$$\bar{E} = \frac{(2\bar{k}^2 - \bar{s}_3^2) \{\bar{s}_1^2 [(\bar{c} - \bar{H}) + \bar{c}_1 (\bar{M} - \bar{c})] + 2\bar{\mu} \bar{h}^2\} - 4\bar{\mu} \bar{k}^2 \bar{\lambda}_1 \bar{\lambda}_3}{(2\bar{k}^2 - \bar{s}_3^2) \{\bar{s}_2^2 [(\bar{c} - \bar{H}) + \bar{c}_2 (\bar{M} - \bar{c})] + 2\bar{\mu} \bar{k}^2\} - 4\bar{\mu} \bar{k}^2 \bar{\lambda}_2 \bar{\lambda}_3} \quad (17)$$

式中 ρ_f 为海水密度, ω 为圆频率, \bar{k}, \bar{S}_i 为复波数, g 为重力加速度, \bar{C}_i 为三类应力波诱起的孔隙水相对位移与土骨架位移的比值, $\bar{\lambda}_i$ 为三类应力波沿深度方向的衰减系数, 在沙质床, $\bar{C}, \bar{M}, \bar{H} \gg \bar{\mu}$ 时, 第一类压缩波与剪切波马赫数远小于 1 的条件下, 可以得到 k_r 与衰减系数 $D=2ki/kr$ 的近似表达式

$$\text{th}k_r h = \frac{\omega^2}{k_r g} [1 - \text{sech}^2 k_r h, \text{Re}\bar{F}] \quad (18)$$

$$D = \frac{-4}{2k_r h + \text{sh}2k_r h} \text{Im}\bar{F} \quad (19)$$

其中
$$\bar{F} = \frac{\rho_f \omega^2 (\bar{C}_1 - \bar{C}_3)}{[\bar{S}_1^2 (\bar{c} + \bar{c}_1 \bar{M}) + \bar{s}_2^2 \bar{E} (\bar{c} + \bar{c}_2 \bar{M})]} \quad (20)$$

$$\bar{E} = -\frac{\bar{s}_1^2 [(\bar{c} - \bar{H}) + \bar{c}_1 (\bar{M} - \bar{c})]}{\bar{S}_2^2 [(\bar{c} - \bar{H}) + \bar{c}_2 (\bar{M} - \bar{c})]} \quad (21)$$

采用迭代法, 可得色散关系与衰减系数, 无量纲波数愈大, 即水愈深, 波长愈短, 衰减得愈慢, 这是因为它们愈不易感受到海底泥床影响的缘故。孔隙水粘性愈大, 土浪渗透率愈大, 波浪衰减得愈快, 这都是比较容易从物理机理可以想象得到的。由于连云港土性参数同 Yamamoto 的土性参数相差不多, 所以其结果也十分相近。

应当指出, 这里的多孔介质模型尚有一定局限性, 也就是说, 因为 Biot 的本构关系是线性的, 所以不能应用于有大变形的情况, 更不能用于研究海洋土的流动情况, 同时, 上述理论中的海洋波浪也使用了线性理论, 这将对波幅与水深有一定限制, 有必要开展海洋波浪与泥底非线性相互作用的研究, 另一方面, 在进行海底稳定性与强度分析时, 以往采用极限平衡的静力分析法, 但在实际上, 海底泥床处在长期周期性载荷作用下, 所以应当给出海底泥床破坏与失稳的动力学准则。这是海洋工程中迫切需要解决的实际问题^[19]。

4 理论与实验、观测结果的比较

本文用前述几种理论模型计算了八组实验和二组现场观测工况下波浪衰减规律, 下面给出与实验和观测数据的比较及对模型适用性的分析。

4.1 理论与实验比较

高容重淤泥床情况: 图 3 给出波在容重为 1480kg/m^3 淤泥床上沿程衰减的实验与理论计算结果(图中 MP, VE 及 BH 分别代表多孔介质, 粘弹和宾汉模型)。该实验曲线在起始一个多波长内变化很小, 分析原因主要是泥槽端板的影响, 泥床的运动受到阻碍, 因此, 波的衰减主要由界面摩擦引起, 离开端板影响区, 根据宾汉模型中 α_s 参数准则, 此时泥床处于间隙运动状态, 这就是说, 淤泥床在波的作用下开始出现微小的运动, 从而加速了波的衰减, 在

此实验工况下理论与实验大体符合较好。其中宾汉和多孔介质模型能更好的反映高容重淤泥床上波衰减规律。图4给出容重为 1360kg/m^3 淤泥床上波衰减情况。结果表明,波在初始几个波长段内衰减很快。然后又逐渐减慢。这与淤泥床的运动状态密切相关。在初始阶段,泥床在波作用下出现明显的泥波运动,随波衰减,下淤泥床运动减弱。在这工况下,非线性模型与实验符合较好。粘弹性模型虽然数量级上与实验相符,但已出现明显偏离。

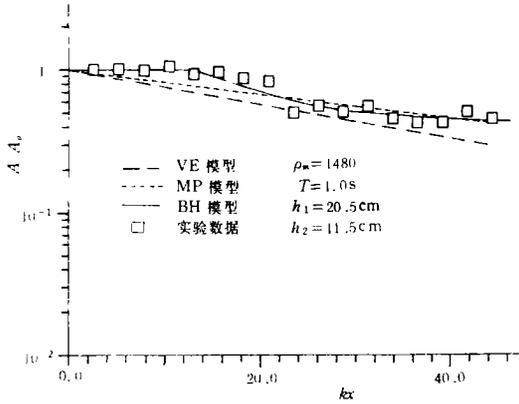


图3 淤泥床上波浪沿程衰减。

在低容重淤泥床上波衰减过程示于图5。实验表明,波在低容重淤泥床上衰减的慢,而且入射波高不影响波的衰减规律。在此工况下,粘弹性和宾汉模型结果与实验吻合较好。在图起始一个多波长段内,实验数据的离散主要由于泥槽端板的影响,除此之外,引起理论与实验之间的偏离,还有来自实验测量误差,其中包括对淤泥流变特性测量中的误差。

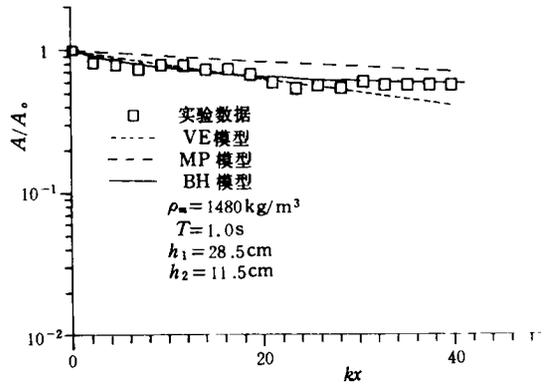


图6 波高沿程衰减

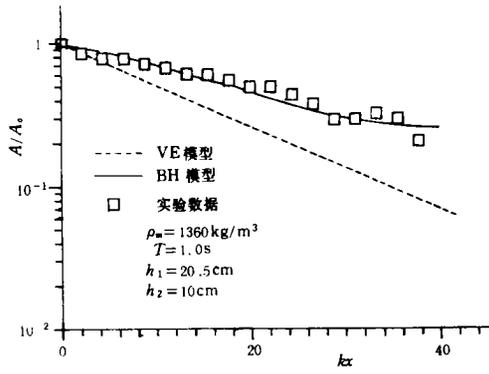


图4 淤泥床上波浪沿程衰减

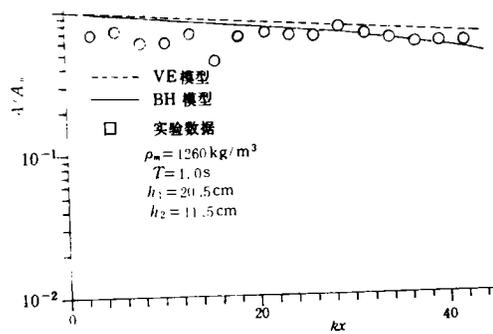


图5 波高沿程衰减

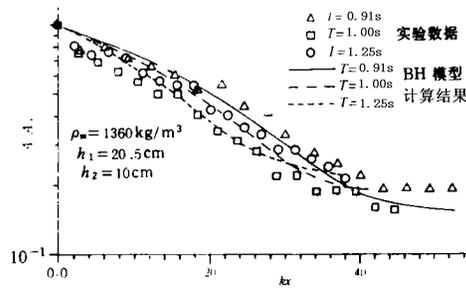


图7 波周期对波高衰减的影响

水深对波高衰减的影响见图3和图6。比较两种结果发现,随水深的增高,波的衰减变缓,主要因为水深增高,泥床对水波的响应减弱,非线性效应也随之减小,因此几种理论模型

的计算结果均与实验符合一致。

图 7 给出波高沿程衰减与波周期的关系。理论曲线是用宾汉模型计算。在本文实验的周期范围： $T=0.9\sim 1.25s$ ，和水深 $h_1=20.5cm$ 条件下，波的衰减对周期的变化并不十分敏感，然而随波周期增大波的衰减稍有加快的趋势。理论计算与实验结果当 $T=0.91s$ 时偏离稍大。

本文用理论模型进行实验工况计算中，淤泥特性参数取自连云港淤泥流变特性实验资料^[11]。宾汉模型的计算中，泥面摩阻系数 f 根据 Jonsson^[20] 提出的波浪作用下光滑湍流边界层界面摩阻系数公式确定。

4.2 理论计算与观测数据

对淤泥质海床上波浪衰减过程进行专门的现场观测是一项耗资而十分艰巨的工作，在此本文采用了华东师大河口海岸研究所提供的连云港大西山 - 西墅 1986 年波浪观测资料(表 1)。大西山与西墅两站相距 7.75km，中间尚均无其它布点。该海域底泥容重约 $1460kg/m^3$ ，活动淤泥层厚约 0.4m。

表 1 连云港大西山 - 西墅波浪观测数据

观测时间	大西山			西墅			备注
	水深(m)	平均周期(s)	平均波高(m)	水深(m)	平均周期(s)	平均波高(m)	
1986.12.20 17:00	6.50	3.3	0.3	1.90	3.26	0.021	1-1
1986.12.25 17:00	6.92	4.2	1.0	2.32	4.30	0.164	1-2

本文用粘弹性和宾汉模型计算了表中工况，考虑海底坡度($\alpha=0.00059$)，在用粘弹性模型计算中将 7750m 长的距离划分为 20 个段，每段视为平底，然后把每段效果累计起来，宾汉模型可以计算有坡度的情况，理论与观测结果示于图 8 和图 9。两者起始水深相接近，但入射波高相差 2 倍之多，结果表明，在低入射波高工况下(图 8)，宾汉模型给出的波沿程衰减规律与观测结果趋势基本一致。在高入射波工况下，两种理论模型结果趋于一致，但比观测结果衰减的快，与观测结果数量约相符。值得注意一点，一般衰减较快的范围只需几十个波长，然后，目前的测点距离太长布点又少，因此只能给出总体衰减趋势的比较。

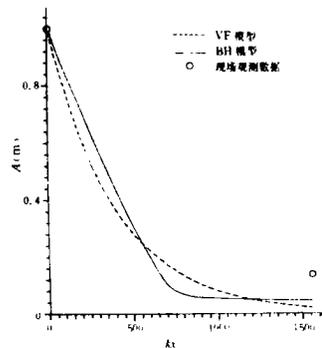
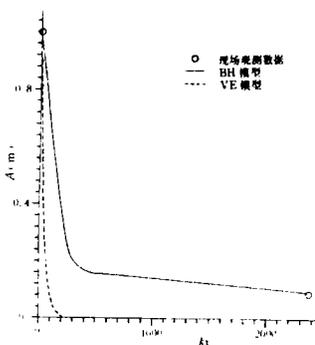


图 8 波高沿程衰减的观测与理论计算工况：表 1-1 图 9 波高沿程衰减的观测与理论计算工况：表 1-2

5 结 论

本文用四种理论模型对连云港淤泥海床上的波浪衰减问题进行了研究,并与实验研究,现场观测结果进行了综合比较,得到以下几点结果。

(1) 在低剪切率情况下,连云港海域淤泥具有宾汉本构关系。

(2) 在高容重淤泥情况下,波浪衰减规律表现出明显的非线性特征,入射波高影响波的衰减规律。

(3) 粘弹性模型适合于模拟低容重淤泥海床上波浪衰减问题,多孔介质模型在研究高容重淤泥床波浪衰减具有良好效果,非线性宾汉模型适用范围大些,但更适于模拟高容重淤泥床与波相互作用问题,该模型有待进一步改进,考虑界面剪切层效应。

(4) 针对连云港实际情况,在研究波浪与淤泥床相互作用问题中需要进一步发展和研究非线性理论模型。

(5) 现场观测波浪衰减过程,注意合理布置与安排测点位置与距离。

致谢:清华大学水利系泥沙室对本文实验工作提供了设备,并给予热情的帮助。华东师大河口海岸研究所为本文提供了宝贵的现场观测资料,作者在此对他们一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Gade, H. G. , J. Mar. Res. ,16(1958),61
- 2 Dalrymple, R. A. and Liu, P. L. , J. Phys. Ocean. 8(1978),35
- 3 Macpherson, H. , J. Fluid mech. ,97(1980). 721
- 4 Hsiao, S. V and Shemdin, O. H. , J Phys. Ocean, 10(1980),605
- 5 Mei, C. C and Liu, K. F. , J. Geophys. Res. 92 C13(1987)
- 6 Zhao et al. Proc. Coastal Port Eng. Der. Count. (1987)
- 7 Yamamoto, T. , J. Fluid Mech. , 87(1978),193
- 8 Yamamoto, T. , Marine Geotechnology. 52(1983),93
- 9 Yamamoto, T. , Applied Ocean Research, 42(1982),99
- 10 Sakakiyama, T. and Bijker, E. W. , J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg. , 115,5(1989)614
- 11 呼和敖德、黄振华、张袁备、力学与实践(1993)
- 12 呼和敖德、黄振华、张袁备、金铎、IMCAS STR-92021(1992)
- 13 Zhou X and Wang, J. , J. Acta mech. Sinica, V. 8(1992)215
- 14 Kolsky, H. , Stress Waves in Solids, Dover. 1963, 213
- 15 Wang J. and Zhou X. , Proc. Znd Int. Cong. Fluid mech. , 1993, Beijing.
- 16 Hanks. R. W. , AICHE J, 20, 1(1974), 173
- 17 Huang Z, H. , Huhe—Aode and Zhang Y. B. , Proc, Znd China-Japan Symposium On Visualization, 1992, Hangzhou.
- 18 Boit, M. A. , Jour. Appl. phys, 34(1962)1254

19 顾小芸,力学进展. No. 1,19(1989),50

20 Jongson, I. G. , Proc. 10th conf. Coastal Engineering. (1966).

WAVE ATTENUATION OVER MUDDY SEABED IN THE LIAN-YUN-GUANG PORT-EXPERIMENT, OBSERVATION AND THEORETICAL ANALYSIS

Huhe-Aode Zhou Xianchu Li Jiachun

Huang Chemhua Lin Mian and Wang Jianfeng

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Jin Liu and Zhang Yuanbei

(Headquarters of Lian-Yun-Guang Port Construction, Lianyungang, 222042)

Abstract: In the present paper, wave attenuation over muddy seabed in the Lian-Yun-Gang port is comprehensively investigated by means of experiment, observation and theoretical analysis. We stress on four typical theoretical models (Viscous, Viscoelastic, Bingham and Poromendium models), which are evaluated and compared with wave flume data and observations. We have further examined their applicability to studying wave attenuation in the Lian-Yun-Gang port. In the end, we hold that the development of nonlinear models for interaction of water wave and seabed in the near future is necessary.

Key words: muddy, seabed, wave attenuation, theoretical model