

岸滩侵蚀的环境工程观念

张我华 蔡袁强 吴昌灿

(浙江大学岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘 要: 本文从环境工程的角度讨论了岸滩侵蚀问题中建立分析模型的基本框架。讨论了岸滩岩土介质在风浪潮作用下, 根据不同的侵蚀准则所建立的岸滩沉积物在近海迁移和传输的模型。得出了岸滩的侵蚀、演变过程由三相组成的结论, 第一相是与饱和多孔介质经受动力荷载变形和损伤相联系的固相; 第二相是关于介质侵蚀和剥离的流-固混合相; 第三相是流动和沉积物运输的流体相。从分析讨论还可以看出, 岸滩侵蚀演化的模拟分析可在岸滩介质的动力固结、悬浮介质扩散漂移及海浪流体动力学理论相互交叉的基础上, 针对海岸环境工程问题中的观念和现象来建模并完成。研究表明, 在分析海滩侵蚀和海岸演化过程的机理时, 采用海洋环境工程学中的相关方法可以得到更符合实际状况的结果。用损伤力学方法建模研究岸滩介质的侵蚀和沙化过程, 可以将海岸沉积物的迁移速率描述为海床面上的等效摩擦剪应力、损伤状态、侵蚀参数及介质的孔隙冲刷率的函数。在岸滩侵蚀和演化机理研究中将海岸沉积物的纵向迁移和横向迁移理论相结合的模型有一定的优越性, 这为岸滩侵蚀与海岸演变提供了定量的分析方法。

关键词: 海滩侵蚀; 海岸演变; 沉积物迁移; 海浪与风暴潮; 环境工程

中图分类号: X145 **文献标识码:** A

0 引言

岸滩侵蚀在世界范围内都是一个严重的问题, 它对社会和经济的发展都有一定的影响。岸滩的侵蚀状态不仅受自然条件影响, 而且也受人类活动的影响。如近岸海域可被用于交通和娱乐场所等设施的开发。岸滩侵蚀会造成严重的近海土地流失及海洋特性和海洋资源的损失, 对海岸线较长的国家更是如此^[1]。而且目前由岸滩侵蚀造成资源流失也正在加速, 使得多种新的环保工程项目和环境保措施亟待开发^[2]。由于人们对海岸形态的防护措施尚缺乏理解^[3], 因此, 需要对海岸侵蚀问题进行量化评估, 同时给出对岸滩管理的有效方法^[1-5]。

岸滩侵蚀主要有长周期趋势性岸滩侵蚀和短周期暴风浪侵蚀2种类型。长周期趋势性岸滩侵蚀主要是由常规的海浪、潮汐作用及河流入海口的流量、流向、泥沙含量的变化等因素造成的^[6,7], 其中一些也可以归于温室效应。短周期岸滩侵蚀的主要原因近海沉积物遇到强烈的暴风潮、飓风和台风的影响发生迁移、搬运, 并使海平面上升和下降及海岸线发生变化^[3-5]。

有关岸滩形成过程方面的研究包括地质形态学者对其实质性演绎和描述方法的研究^[8-10]和环境学者对其与波浪作用、近岸水流、岸滩的沉积物迁移和海滩侵蚀相关问题的研究^[4,5,11]。对于近岸波浪场的分析可根据具体情况选用不同的波浪和潮汐模型来计算。在许多情况下, 计算得到的波浪场可用于估计水流散射应力的分布和海底附近水流速度的变化。近岸波浪和潮流的状况也可用来计算沉积物的迁移。因为, 沉积物颗粒的运动对流体动力学特性的反应非常灵敏, 因此只有建立了精确的流体运动模型, 才能将沉积物迁移模型、海水流动模型和岸滩介质的侵蚀模型结合在一起进行较精确的研究。本文就岸滩侵蚀的环境工程观念进行了一些讨论。

1 海浪和风暴潮的作用模型

海浪和风暴潮(Storm surge)是海洋中发生的2种重要的自然现象, 也是引起海洋灾害的2种主要的原因。因此, 研究其成因、过程、机制变化规律及其预测、预报方法一直是海洋科学家研究的重要领域之一。

1.1 海浪与风

在海洋上的风 and 海浪的运动向着海岸传播。这种连续的能量是引起海岸线短期变化的主要原因。风浪在振幅、周期和方向上都是随机的。近岸区驱动流体运动的能量主要是由风浪提供的。在海面区域, 从内海向岸滩而来的风浪, 被当做入射波, 入射的海浪一般被表示为周期不到20s的有限振幅重力波。在海浪中还有亚重力波或长周波成分, 其周期在20~200s之间, 通常被认为是近岸潮位, 它们是由引力控制的, 而不受入射波控制。目前, 亚重力波的控制方程尚未得到定义。

海浪模型是分析浪潮对岸滩作用的理论基础。最简单的波浪模型是一阶线性理论的Air波, 它给出的波幅一般比实际的有限波幅小。岸滩侵蚀问题中的波浪是在浅水海滩传播的, 其波浪是非线性的, 属于破碎波。不能直接应用线性波浪理论。应采用非线性波浪模型, 常用的浅水非线性波浪模型有椭圆余弦波和斯托克司(Stokes)波。但其封闭表达式比较复杂。文献^[11]给出了斯托克司二阶近似非线性波浪模型和线性波浪模型的相关公式。

风是海浪产生和传播的动力。风对浪潮的影响一般通过一组风浪因子来描述^[12,13]。计算风浪因子的模型如下

$$\frac{gH}{V^2} = 0.13 \tanh \left[0.7 \left(\frac{gd}{V^2} \right)^{0.7} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0018 \left(\frac{gF}{V^2} \right)^{0.45}}{0.13 \tanh \left[0.7 \left(\frac{gd}{V^2} \right)^{0.7} \right]} \right\} \quad (1)$$

• 收稿日期: 2001-10-18

作者简介: 张我华(1945—), 男, 博士, 教授博导, 从事岩土工程力学和环境工程的研究。

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(编号: 29823)

$$\left. \begin{aligned} \frac{gT}{V^2} &= 13.9 \left(\frac{gH}{V^2} \right)^{0.5} \\ \frac{gt_{\min}}{V^2} &= 16.8 \left(\frac{gT}{V^2} \right)^{3.15} \\ L &= \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 H 为平均波高, T 是平均波浪周期, V 为风速, d 为水域平均水深, t_{\min} 为风浪稳定所需的最短时间。风域长度 F 可根据参考文献[13]推荐的程序进行计算。

由于海浪是随机而复杂的。因此,可以用波浪场的功率谱法来确定能量随频率的变化。目前,已有许多模型用于分析世界各地海浪记录所得到的大量的频谱,并基本弄清了海浪频谱的特性。如可采用文献[14]中的方式表示风浪谱

$$s(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (3)$$

其中 $H_{1/3}$ 为从波群中取 1/3 数量的波的平均波高; $T_{1/3}$ 该 1/3 数量的波的平均周期; f 为谱频率。

1.2 风暴潮

风暴潮是指由于大风和伴随的大气压力急剧改变而导致海洋或湖泊水面异常升降的现象。通常将它视为一个强迫行进波,它形成了由风暴中心向四周传播出去的自由波,并以长周波的速度移行的,其传播速度大于比风暴中心移动的速度。当自由波传播到大陆架浅海水域时,特别是风暴所带动的风暴潮进入大陆架浅海,或进入边缘海、海湾或河口时,可使岸边水位的变化超过大洋上水位的变化。文献[9]提出了一个简单的方程,用该方程按文献[10]中指出的概念能估算潮涌的速度

$$v_1 = 2.7 u_m \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (4)$$

其中 v_1 为浪潮中点位置处的顺岸潮涌速度; u_m 为在波浪潮破碎区估计的最大水平轨迹速度的值; α_b 是浪潮破碎角度。

文献[15]在文献[16]基础上,对近岸浪潮传播和沿岸的潮涌发展了一种数值分析模型,但是它是针对随机海浪的。这些方程包含了海浪传播、海浪冲刷力、风向、海底的摩擦力及其它因素的混合影响。

1.3 浪潮作用模型

在海浪作用下海滩介质随海水迁移流动的轨迹速度可按文献[11]的方法用斯托克司二阶非线性波浪理论计算

$$V = \bar{v} + \frac{1}{2C} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{\cos[2k(D-z)]}{\sinh^2(kD)} + \frac{9}{32C} \left(\frac{\pi H}{T} \right) \left(\frac{T}{L} \right)^2 \frac{\cosh[4k(D-z)]}{\sinh^8(kD)} \quad (5)$$

其中 H 为波浪高度, k 为波数, T 为波浪周期, L 为波长, C 为波的传播速度。式中第一、二项是线性波浪的贡献,第三项是非线性波浪的贡献。在靠近海底处($z=D$),海底表面的平均流速变 \bar{v}_b 为

$$\bar{v}_b = V|_{z=D} = \bar{v} + \frac{V_{1m}^2}{2C} = \bar{v} + \frac{V_{2m}^2}{2C} \quad (6a)$$

其中 V_m 为海滩底面上介质的最大水平轨迹速度。

$$V_m^2 = V_{1m}^2 + V_{2m}^2, V_{1m} = \frac{H\pi}{T} \frac{1}{\sinh(kD)} \quad (6b)$$

当自由波冲向海岸线附近破碎时,产生一个沿岸滩的潮涌。按能量流模型描述潮涌,在海岸附近通过某平行于海岸线潮峰的一个给定垂直平面上,单位面积上平均能量的变化根据斯托克司二阶非线性波浪模型可表示为

$$E_{av} = \frac{\rho}{T} \int_0^{T-\gamma} \int_b^y \Phi \Phi_y Y dz dt = \frac{1}{16} \rho g C H^2 \left[\frac{\sinh(2kD) + 2kD}{\sinh(2kD)} + \left(\frac{3kH}{4} \right)^2 \frac{\sinh(4kD)}{\sinh(2kD)\sinh^6(kD)} \right] \quad (7)$$

其中 ρ 是水的密度, H 是从静水水面开始计算的波浪表面的高度,式中,第二项为非线性波的贡献[11], C 为波速。

海浪的破碎是岸滩生成过程中重要的现象之一。波浪破碎后对岸滩的冲刷摩擦应力可根据平均能量流量和介质迁移速度将其表示为

对非线性波浪模型[11]

$$\bar{\tau}_b = - \frac{8T^3 \sinh^6(kD) \tanh(kD)}{9\rho\pi^3 H^4} \bar{v}_b \left| \frac{\partial}{\partial y} (E_{av}) \right| \quad (8a)$$

对线性波浪模型[17]

$$\bar{\tau}_b = - \frac{3T^3 \sinh^3(kD)}{4\pi^2 H^3} \bar{v}_b \left| \frac{\partial}{\partial y} (E_{av}) \right| \quad (8b)$$

由于浪潮能量仅有很小一部分用于驱动沿岸潮涌发生,因此从能量角度研究沿岸潮涌产生的方程是很困难的[2,5]。目前,根据能量流模型、动量流模型和质量连续模型发展出了许多用于预测沿岸潮流当前速度的模型[5,10,12]。

2 沉积物迁移模型

目前,用于预测海岸线变化的模型中既包括多相介质运动学也包括动力学的基础。在各种模型中有 Bruun, Edelman[18], Dean[19]等,其中 Edelman 模型较为大家所认可[20]。

沉积物的运动通常比海浪和潮流更复杂。文献[18]指出,岸滩介质质量传输的发生也许是因为靠近海底的沉积物被浪潮在岸边来回搬运所造成的。沉积物的迁移在岸滩横向和岸滩纵向都会发生,因为建造防浪结构时需要考虑岸滩纵向迁移运输,因此,对其的研究也得到了重视。目前有许多描述浪潮发生的经验公式,如文献[9]中一些公式。如

$$I_1 = 0.77 (E_{cn})_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (9)$$

式中 I_1 是沉入水中沉积物的浸湿重量的运输率, E_{cn} 是在波浪破碎区估算的波浪能量流。式(9)仅适用于各种波浪翻倾所产生的海沙运输。

文献[21]结合波浪和潮汐,给出了更一般的海沙运输表达式。如

$$I_1 = 0.28 (E_{cn})_b \cos \alpha_b \frac{v_1}{u_m} \quad (10)$$

文献[22]为岸滩纵向沉积物的运输提出了水力的模型试验,并且指出沉积物运输速率是波浪、流体、沉积物和海滩轮廓参数的复合函数。可以按下式表示

$$Q = f(H, T, \bar{\alpha}, D, \rho, u, g, x, y, z, t, \rho_s, d, m) \quad (11)$$

式中 Q 为纵向岸滩沉积物的运输速率, H 为海浪高度, T 为海浪周期,为途径的角度, D 为水的深度, ρ 为流体的密度, μ 为流体的粘性系数, t 为时间, ρ_s 为沉积物密度, d 为颗粒大小, m 为海滩倾斜度。从中可以看出,沉积物的运输速率是与海浪能量成比例的,同时,也是海滩斜坡度的函数,且主要取决于沉积物的颗粒大小。

文献[23]对悬浮沉积物提出了一种有限差分模型,该模型考虑了海浪周期、海浪高度、沉积物降落速度、初始海底轮廓、海底表面的坡度及摩擦系数。文献[11,17]提出了有关海滩侵

造成海岸演变问题的数值模拟模型。该模型是根据海岸线演化和海滩断面的沉积物的迁移理论建立一种顺岸方向和海滩横断面方向海岸形状变化的耦合模型,可以表示如下

$$\rho_s \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\rho_s}{2} \left(\frac{\partial Y}{\partial t} - \bar{\tau}_b \right) \frac{\partial D}{\partial y} = \frac{M_c}{(I - \alpha)} \left[\frac{\bar{\tau}_b}{(1 - \Omega)^2 \tau_c} - 1 \right] \quad (12)$$

$$\rho_s \frac{\partial \dot{Y}}{\partial x} - \frac{I}{(I - \alpha) D} \frac{\partial Q}{\partial (\partial \dot{Y} / \partial x)} \frac{\partial \dot{Y}}{\partial x^2} = 0 \quad (13)$$

式中 $\bar{\tau}_b$ 为海滩底表面的平均摩擦应力, τ_c 为海滩底表面上介质的剪切强度, Ω 和 γ 分别为岸滩介质的侵蚀状态参数及介质剥离率, M_c 为与单位面积上单位时间内受侵蚀物质的剥离速率, α 为介质的有效孔隙比, \dot{Y} 为海岸线的曲线方程是时间和坐标 x 的函数, Q 为沉积物沿着海岸线方向的迁移速率,它是据波浪高度和方向的统计资料得到的。沿海岸线方向的沉积物迁移速率可表示为

$$Q_s = a_q \left(b_q \frac{\partial \dot{Y}}{\partial x} \right)^{\gamma}$$

式中 a_q 、 b_q 和 γ 是由观测数据拟合出的系数。文献 [24] 给出了一种线性表达式

$$Q_s = 2.27 \times 10^6 \left(0.15 - \frac{\partial \dot{Y}}{\partial x} \right) \quad (14)$$

该方程是岸滩介质因受侵蚀变为沉积物并迁移所导致的海滩地形变化的模型。该模型耦合了海岸线的变化速率、海底表面上的平均剪应力以及波峰处单位面积传递的平均海浪能量流的影响。整个模拟过程能同步地包含海滩变形和海岸线的变化之间的相互影响。

文献 [11] 和 [17] 用上述模型模拟了某海岸侵蚀演变问题中海岸线(沿岸方向)和岸滩断面(垂直海岸线方向)的地形变迁情况的结果如图 1 和 2 所示。

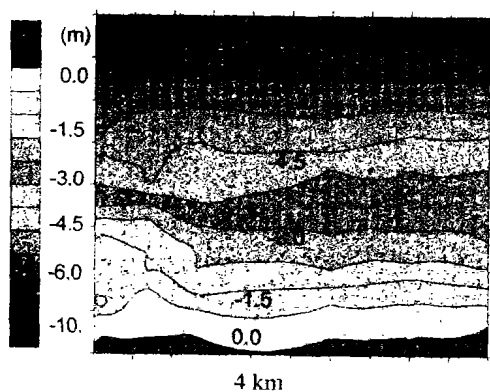


图 1 岸滩地貌形态的初始等高线图

Fig. 1 Contours for the initial bottom topographic of the analyzed beach profile

沿海区域的沉积物可能包括从石子、沙粒到泥土、淤泥。凝聚性沉积物的沉积要经历沉淀、聚集、析出、胶结、侵蚀和对流/扩散的运输过程^[25]。在运输模型中,悬浮沉积物的对流/扩散运输过程可用悬浮沉积物的浓度描述。

3 侵蚀准则

3.1 低凝聚性材料

在海滩侵蚀的问题中,沉积物主要是泥沙^[6,7],侵蚀准则是以某部分沉积物发生运动的临界剪应力为基础的。如果海底介

质的最大剪应力超过临界剪应力,则可以假定沉积物的那部分体积将被移动。海底介质的最大剪应力可以磨擦定律为基础计算。为此,必须定义底部的粗糙度和沉积物的颗粒尺寸。目前,这个模型基本上是经验的^[21,26]。

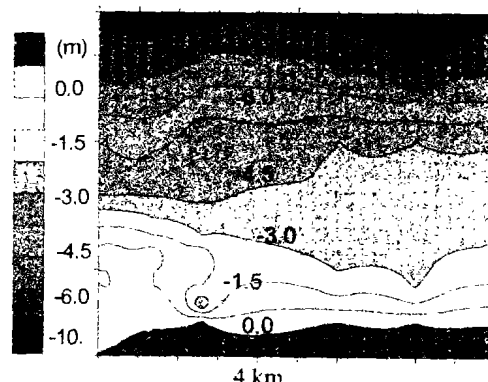


图 2 强风暴潮作用后岸滩地貌形态的等高线图

Fig. 2 Bottom topography of the beach profile due to effects of the stormy wave and tide

3.2 凝聚性材料

一种凝聚性介质的沉积海床厚度能从 1 cm 到 1 m 间不等。通常上部的介质随水位的高度变软,且处于部分固结状态。固结会影响临界剪应力,并影响侵蚀率。在凝聚性土被侵蚀以前,内质点之间的骨架必须首先破碎,此时,作用应力必须超过临界剪应力。凝聚性土与欠凝聚性土之间的主要差别是欠凝聚性土的侵蚀阻力只是由重力造成。同时,侵蚀过程中的侵蚀速率对海床上的剪应力超越临界剪应力的影响也很重要^[3]。

对侵蚀的研究表明,按深度平均的悬浮沉积物质量浓度 C ,在侵蚀期间随时间 t 线性增加。侵蚀率可作为浓度随时间的变化率表示为

$$e = D \frac{\partial C}{\partial t} \quad (15)$$

式中 e 为侵蚀速率; D 为水的深度。

式(16)是一个适用均匀的但比较稠密的沉积物的侵蚀率表达式^[27]。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = M \left[\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right] \quad \tau_b \geq \tau_c \quad (16)$$

式中 M 是侵蚀率常数,它可被定义为当海底流体内部之间的剪应力增加到海底土介质的临界剪应力时所引起侵蚀速率的增加。 τ_b 为当侵蚀发生时海床剪应力的时间平均值。 τ_c 为临界剪应力。常数 M 与侵蚀率有同样的单位,并且从土层到土层是变化的。影响临界剪应力的主要因素是正在实施侵蚀的液体、水中温度、水内有机物和介质的应力历程。研究发现润湿程度或固结压力对饱和土侵蚀能力特性对临界剪应力也有一些影响。文献 [27] 在 200 多件样品上进行了测试,结果表明,侵蚀率常数 M 在 $0.003 \sim 0.03 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 的范围内变化。文献 [11] 提出的海滩介质的侵蚀准则是在文献 [28] 的表达式基础上,考虑侵蚀和剥离参数对介质材料性质的影响,用靠近海岸线处海滩底部表面上单位面积上被侵蚀的沉积物的质量变化速率来定义侵蚀准则,并将其表示为

$$\frac{dm}{dt} = M_c \left(\frac{\bar{\tau}_b}{(I - \Omega)^2 \tau_c} - I \right) \quad (17)$$

式中 $(1-\Omega)^{-1}\tau_c$ 为海滩底表面上的介质受到侵蚀损伤后被水流冲刷、剥离为沉积物时的临界有效剪应力。该临界有效剪应力跟一些文献中材料的损伤破坏的有效临界剪应力有相似的表述^[29,30]。海滩介质受侵蚀和剥离的状态可分别用蚀损状态参数 Ω (孔隙被搂空) 以及沉积剥离状态参数 γ (介质剥离率) 来表示。系数 M_c 与侵蚀介质流动速率的单位相同且随其它一些因素,如温度、有机物质的存在等发生变化。图3给出了可用蚀损及剥离状态参数 Ω 、 γ 和应力比值确定侵蚀率无量纲因子 $(dm/dt)/M_c$ 的曲线。文献[31]研究了 M_c 和沉积物的活动交换能力、钠离子吸附率、孔隙流的浓度和温度间的关系。结果表明, M_c 的值通常在 0.005~0.015 之间,且随温度的变化而急剧变化,高温下更明显。

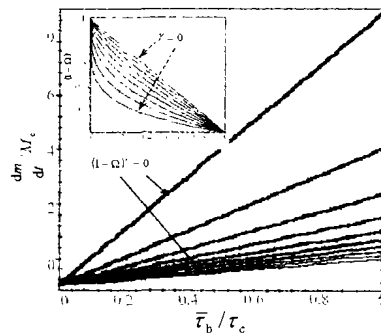


图3 蚀损状态参数和临界抗剪强度对介质侵蚀率的影响

Fig. 3 Effects of erosion-damage state parameter and critical shear strength on the erosion rate of coastal medium

文献[32]给出了用实验研究松软的凝聚性沉积物侵蚀行为的结果,得到下式

$$\frac{\mathcal{X}}{\alpha} = e_1 \exp[\alpha(\tau_b - \tau_c)^{\frac{1}{2}}] \quad (18)$$

式中 e_1 为絮状凝聚物侵蚀率, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$; α 为与温度成反比例的因子, $\text{m}/\text{N}^{\frac{1}{2}}$; τ_b 为海床剪应力的时间平均值, τ_c 为剪切强度。 e_1 为当 $\tau_b - \tau_c = 0$ 时,即当与表面侵蚀有关的零平均流速发生时的 e 值。参数 α 与 e_1 的值随各种土层变化而变化。根据文献[32]的测试结果,在 $13.6 < \alpha < 18.4$, $0.5 < e_1 < 3.2 \times 10^{-5}$ 。

3.3 沉积

文献[26]给的沉积定律为

$$\frac{\mathcal{X}}{\alpha} = \frac{W_s C}{H} \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right] \quad (19)$$

式中 W_s 为沉积颗粒的落定速度,它取决于浓度, τ_{cd} 为沉积发生的临界剪应力。

3.4 落定速度

落定速度会影响沉积率。凝聚性材料的落定速度与土颗粒的尺寸密切相关^[26],可以表示为

$$\left. \begin{aligned} W_s &= \text{const} & C < C_1 \\ W_s &= K_1 C^{-\eta} & C_1 < C < C_2 \\ W_s &= W_{s0} [1 - K_2 C]^{\beta} & C < C_2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中 K_1 、 η 、 K_2 和 β 是与沉积物成分和悬浮流体的流量有关的常数。 W_{s0} 是相对落定速度。 C_1 和 C_2 是取决于沉积流体混合类型的浓度。

4 结论

本文对对岸滩侵蚀演化的机制进行了讨论,且重点集中在

岸滩侵蚀的环境工程观念上。岸滩的侵蚀是一个复杂的问题。侵蚀本身由三相组成。第一相是与饱和和多孔介质经受动力载荷的变形和损伤相联系的固态相;第二相关于介质的侵蚀和剥离的流-固态混合相;第三相是流动和沉积物运输的流体相。因此,必须在动力固结、悬浮介质扩散及海浪流体力学理论的基础上对这些现象建模。由于这三相相互依赖的固有特性,所以,有必要采用一些特殊的迭代方式去求解描述岸滩侵蚀和演化问题的控制方程。

References (参考文献)

- 1 Ruan Chenjiang (阮成江), Xu Qingliang (谢庆良) and Xu Jin (徐进). Coastal erosion and protection measures in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2000, 14(1): 44~47
- 2 Yu Guohua (喻国华) and Shi Shikuan (施世宽). Erosion analysis and regulation measures for the beach in Lusi Jiangsu Province [J]. *The Ocean Engineering* (海洋工程学报), 1985, 3(3): 26~37
- 3 Dyer R K. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamic* [M]. New York: A Wiley Interscience Publication, 1986
- 4 Hanson H and Kraus N. Numerical simulation of shoreline change at Lorain [J]. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engg.* 1991, 117(1): 1~18.
- 5 Horikawa K. *Near Shore Dynamic and Coastal Processes* [D]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1988.
- 6 Yun Caixing (恽才兴). Research on the nearshore process of the typical coast of the Bohai Bay [J]. *Engineering Science* (中国工程科学), 2001, 3(3): 42~51
- 7 Cheng Heqin (程和琴) and Wang Baocan (王宝灿). Development of the sand waves stability analysis under the combined influence of waves and currents [J]. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 1996, 11(4): 367~371
- 8 Hong Shangchi (洪尚池) and Wu Zhiyao (吴致尧). An analysis of the coastline shifting around the estuary of the Yellow River [J]. *The Ocean Engineering* (海洋工程), 1984, 2, 68~75
- 9 Komar P and Inman D. Longshore sand transport on beaches [J]. *J Geophys Res.* 1970, 76, 713~721
- 10 Longuet-Higgins M. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves [J]. *J Geophys Res.* 1970, 75, 6778~6801
- 11 Zhang Wohua (张我华), Wu Changcan (吴昌灿) and Jin Yi (金冀). Numerical modeling for beach erosion [J]. *The Ocean Engineering* (海洋工程), 2002, 20(2): 26~32
- 12 Zhang Wohua, Chen Yunmin and Jin Yi. Method of probability analysis for break water stability [A]. In: Nakase A, Tsuchida eds. *Coastal Engineering in Practice; Vol 1* [C]. Proc Int. Symp IS-YOKOHAMA 2000, Yokohama, Japan: 2000, Balkema, Rotterdam, 2000, 399~406
- 13 National Standard, *Code for Design of Levee Project* (堤防工程设计规范) [S], GB 50286-98
- 14 合田良实. *Design of Wave-prevent for Harbor Construction Engineering* (港工建筑物的防浪设计) [M]. Liu Dazhong (刘大中) and Sun Jucai (孙巨才), trans. Beijing: Chinese Ocean Press, 1984, 26~27
- 15 Larson M and Kraus N C. Numerical model of longshore current for bar and trough beaches [J]. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engg.* 1991, 117(4): 326~347

- 16 Baum S K and Basco D R. A numerical investigation of the long-shore current profile for multiple bar/trough beaches [A]. In: Proc 20th Coastal Engg Conf, ASCE, 1986, 971~985
- 17 Zhang Wohua, Chen Yunmin and Jin Yi. Numerical modeling for beach profile [A]. In: Nakase A, Tsuchida eds. *Coastal Engineering in Practice, Vol 1* [C]. Proc Int Symp IS-YOKOHAMA 2000, Yokohama, Japan, 2000, Balkema, Rotterdam, 2000, 407~412
- 18 Komar P. *Beach Processes and Sedimentation* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1976
- 19 Dean R. *Equilibrium Beach Profiles* [R]. US. Atlantic and Gulf Coasts, Ocean Engg. Report, No. 12, Dept Civil Engg, Univ of Delaware, Newark; 1977
- 20 Dean R and Maurmeyer E. *Models for Beach Profile Response* [M]. CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, 1981, 151~164
- 21 Inman D and Bagnold R. *Littoral processes* [A]. In the Sea [A]. Hill M Interscience, Wiley, New York; 1963, 3, 529~554
- 22 Kamphuis J. Alongshore sediment transport rate [J]. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engg*, ASCE, 1991, 117(6): 624~640
- 23 Dally W and Dean R. Suspended sediment transport and beach profile evolution [J]. *J Waterway, Port, Coastal and Ocean Engg*, ASCE, 1984, 110(1): 1~13
- 24 Fredsoe J and Deigaard R. Mechanics of coastal Sediment Transport [A]. In: Advanced Series Ocean Engineering Vol 3 [C]. World Scientific Publishing Co Pty Ltd, 1992, 341~347.
- 25 Pathirana K, Yu C S and Berlamont J. Modeling cohesive sediment transport in tidal waters [A]. Proc. Hydro-Port 94, Yokosuka, Japan: Port and Harbor Research Institute, 1994, 1271~1290
- 26 Krone R. Flume studies of the transport sediment in estuarial shoaling processes [R]. *Report of Hydraulic Engg*, Lab, Univ of California, Berkeley, 1962
- 27 Ariathurai R and Arulanandan K. Erosion rates of cohesive soils [J]. *J Hydraulic Engg*, ASCE, 1978, 104(2): 279~293
- 28 Hans Hanson and Nicholas K. Numerical simulation shoreline change at Lorain Ohio [J]. *J of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engg*, ASCE, 1991, 117(1): 1~18
- 29 Zhang Wohua and Valliappan S. Continuum damage mechanics theory and application-part I; theory and part II; application [J]. *Int J of Damage Mech*, 1998, 7, 250~273, 274~297
- 30 Valliappan S and Zhang Wohua. Numerical modeling of methane gas migration in dry coal seams [J]. *Int J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20, 571~593
- 31 Ariathurai and Arulanandan. Erosion rates of cohesive soils [J]. *J Hydraulic Div*, ASCE, 104, HY2, 1978, 279~283
- 32 Parchure T and Mehta A. Erosion of soft cohesive sediment deposits [J]. *J Hydraulic Engg*, ASCE, 1985, 111(10): 1308~1326

A RESEARCH INTO SOME ENVIRONMENTAL ASPECTS OF BEACH EROSION

ZHANG Wo-hua, CAI Yuan-qiang & WU Chang-can

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper presents some environmental protection aspects on how to prevent the sea beach erosion so as to establish a basic modeling frame for analysis. The said modeling frame should be put on the basis of the interdisciplinary theories among the dynamic consolidation of the coastal medium, the diffusion and transportation of sediments and the fluid dynamics of the tided waves. For this purpose, different models of the sediment transition on the different erosion criteria of coastal medium under various actions of storm wave and tide have been analyzed and discussed. The process of beach erosion and coastal evolution can be considered to have three dynamic phases. The first phase is the solid phase, which is related to the deformation and damage of saturated porous medium under the dynamic actions. The second phase is the fluid-solid interactive one, which deals with the erosion and the process of peeling off the coastal medium. The third phase is the fluid one, which consists of the water flow and sediment transition. The theory suggests that all the aspects and phenomena should be taken into comprehensive account in environmental engineering for simulating the process of the beach erosion and coastal line evolution. Taking some results present into consideration from the point of view of damage mechanics, the process modeling of the segregation of the coastal material from solid particles and sands down to very tiny sediments, the sediment transition rate can be expressed in a function of the equivalent fraction stress on the surface of the coastal line bed and the damage state or erosion parameters of coastal media as well as in equivalence with the porous evolution due to water drift through porous substances. An integrated model that combines the theory of cross-shore and a long-the-shore sediment transition thus can provide some advantages in presenting the mechanism of beach erosion and coastal evolution problem. Therefore, the above studies may help to develop a method for the quantitative analysis of the beach erosion and coastal line evolution.

Key words: beach erosion; coastal evolution; sediment transport; ocean wave and storm surge; environmental engineering

CLC number: X145 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2002)03-0008-05

(Journal of Safety and Environment 2002, Vol. 2, No. 3)