

## 波浪与浮泥海床的相互作用问题

赵子丹

(天津大学)

### (一)

海岸按其组成物质的不同,可分为岩质海岸、沙质海岸和淤泥质海岸。淤泥质海岸多位于平原河流及大河河口附近,我国很多海岸是淤泥质海岸。这种海岸的基本特征是滩面宽广,坡度平缓、滩面的组成物质很细,且粘性颗粒所占比重很大。从淤泥质海岸波浪运动的动力特性来看,一是波浪在传播过程中的沿程衰减较快,这在我们六十年代进行水槽试验时就发现过。根据美国密西西比河三角洲地带的现场观察表明,这种衰减速度比波浪在沙质海岸地带的衰减速度(如果从考虑波浪作用下液体内部的能量损耗,以及床面摩阻的能量损耗的原理来估计的话)大致要大一个量级。二是它的破碎形态与沙质海岸的波浪的破碎形态不同。因为淤泥质海岸的海底平缓,波浪从深水区传播到浅水区,要经历相当长的距离,从而使波浪能量大量损耗。故在波浪破碎时,水体运动的强烈程度比较低,濒临破碎时的波形相对说比较完整,这在对比新港地区的波浪破碎现象和青岛地区的波浪破碎现象可以证明这一点。由此估计,就由波浪的破碎所造成的沿岸流的特征来说,也应该与在沙质海岸所得到的结果有所不同。

岸滩演变,本质上是由于海岸与动力条件相互作用的结果,动力条件的作用使物质发生运动,从而造成海岸的冲、淤变化,而海岸的地形、地貌作为边界条件,又影响到动力条件的特性。在淤泥质海岸,其海岸物质在动力因素的作用下极易悬浮。海岸动力因素的作用在历时过程中是不稳定的,当动力因素由强变弱时,部分已被悬浮的物质会发生沉积;但因这种沉积的物质又来不及充分固结(因为这种动力因素的减弱不会是永久的),其容重不会过大。这种沉积物具有流动性,即所谓浮泥。此现象在世界很多海岸、河口均有,因而引起了人们的广泛重视。

海岸的动力因素主要是波浪、潮流。和潮流相比可以认为,波浪的垂直向运动强烈,净输送作用微弱,因而波浪对物质主要起悬浮作用,潮流对物质主要起输送作用。于是,关于波浪作用下的泥沙悬浮问题,即在特定的波浪和泥沙粒径的条件下,水中的悬沙浓度及其沿水深分布的规律问题,便成为有实践意义的课题。在实验室条件下,如果先在水槽下部铺泥,上面放水,再用规则波在固定的水深条件下以持续稳定尺度的波浪连续作用,则悬沙浓度沿水深分布的规律必然是从泥面向上逐渐减小;如果波浪尺度较大、泥沙颗粒较细,则其分布趋近于均匀,但仍然是“上小、下大”。这是因为,水体中的泥沙是从海底被波浪掀起的,是由于浓度差的存在而产生的扩散作用,使泥沙向上悬浮,即由于下层水体中有浓度梯度使泥沙悬浮。可以设想,如果没有一种特殊的具有吸收能力的“中心”,物质的扩散多少总要保持一个浓度梯度,即物质从高浓度处流向低浓度处。在上述条件下,设想原来低浓度的地方变成高浓度,原来高浓度地方变成低浓度,则是难于实现的。当然,现场观察到的悬沙分布图形是多样的,这则是在自然界有多种变化

着的动力因素在发生作用的缘故。

## (二)

从宏观的观点来看, 浮泥可看成一相流体。根据钱宁等的研究, 浮泥的流变特性, 主要取决于构成浮泥的泥沙的成份, 特别是其中的粘性颗粒的含量。他们曾经指出, 当颗粒粒径大于0.02—0.03mm时, 即使水、泥混合物中的含沙浓度高达300—400kg/m<sup>3</sup>, 该混合物仍是牛顿流体; 而在泥沙颗粒极细, 且含量很小时, 该混合物便常常是塑性流体。结合我国的淤泥质海洋的情况, 对浮泥流变特性考虑, 主要是塑性流体和牛顿流体。因此, 如果泥、水的交界面未被破坏, 则可把波浪与浮泥海床相互作用的问题用分层流体中的波浪运动, 从理论上予以概括。现有的各种理论的差别, 主要在于以下三个方面: 一是表面波是中等水深的波浪还是长波; 二是把上层流体假定为理想流体还是粘性流体; 三是把下层浮泥假定为理想流体、粘性流体, 还是弹性体及粘弹性体等等。据笔者所知, 对于下层浮泥为塑性流体的情况, 在国外还无人研究过。

关于上、下层均为理想流体(但密度不同)的情况, 可视为分层流体中波浪运动的经典问题, 在富永政英(1976)的《海洋波动》一书中曾有所报道。原作者假定流体运动为有势的, 把由该假定给出的泛定方程和边界条件结合在一起, 导得了波速的表达式。笔者对上述成果进行过详细的核对, 发现其中存在着一些数学中的错误。于是, 按照上述同样的物理假定, 导出了以下的结果(推导时所采用的座标系统, 取X轴在交界面, Z轴向上为正)。

### 1. 界面波的振幅

$$a_2 = \frac{a_1}{\sigma} (\sigma^2 \cosh kh_1 - k g \sinh kh_1) \quad (1)$$

### 2. 色散关系

$$\sigma^2 \sinh kh_1 - k g \cosh kh_1 - \left[ \frac{k g}{\sigma^2} \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) - \left( \frac{1}{\sinh kh_2} \right) \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right] (\sigma^2 \cosh kh_1 - k g \sinh kh_1) = 0 \quad (2)$$

### 3. 上层流体中的水平、垂直轨迹速度

$$u_1 = \frac{a_1}{\sigma} [k g \cosh k(h_1 - z) - \sigma^2 \sinh k(h_1 - z)] \cdot \cos(kx - \sigma t) \quad (3)$$

$$w_1 = \frac{a_1}{\sigma} [\sigma^2 \cosh k(h_1 - z) - k g \sinh k(h_1 - z)] \cdot \sin(kx - \sigma t) \quad (4)$$

### 4. 下层流体中的水平、垂直轨迹速度

$$u_2 = \frac{a_1}{\sigma \sinh kh_2} (\sigma^2 \cosh kh_1 - k g \sinh kh_1) \cdot \cosh k(h_2 + z) \cos(kx - \sigma t) \quad (5)$$

$$w_2 = \frac{a_1}{\sigma \sinh kh_2} (\sigma^2 \cosh kh_1 - k g \sinh kh_1) \cdot \sinh k(h_2 + z) \sin(kx - \sigma t) \quad (6)$$

### 5. 上层流体中的传质速度

$$\bar{U}_1 = \frac{k a_1^2}{2 \sigma^3} \{ (\sigma^4 + k^2 g^2) \cdot (\sinh^2 k(h_1 - z) + \cosh^2 k(h_1 - z)) \}$$

$$-4\sigma^2 k g \sinh k(h_1 - z) \cdot \cosh k(h_1 - z) \} \quad (7)$$

6. 下层流体中的传质速度

$$\begin{aligned} \bar{U}_2 = & \frac{ka_1^2}{2\sigma^3 \sinh^2 kh_2} \{ \sigma^2 \cosh kh_1 - k g \sinh kh_1 \}^2 \cdot \{ \cosh^2 k(h_2 + z) \\ & + \sinh^2 k(h_2 + z) \} \end{aligned} \quad (8)$$

在分析了运动的稳定性条件后指出, 只有当

$$D_2^2 - 4D_1 D_3 \geq 0 \quad (9)$$

时, 运动才是稳定的。其中:

$$\begin{aligned} D_1 &= \sinh kh_1 + \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left( \frac{\cosh kh_1}{\sinh kh_2} \right) \\ D_2 &= - \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) k g \left[ \cosh kh_1 + \left( \frac{\sinh kh_1}{\sinh kh_2} \right) \right] \\ D_3 &= \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) k^2 g^2 \sinh kh_1 \end{aligned} \quad (10)$$

方程(1)至(10)中,  $a_1$ 代表表面波的振幅, 它等于波高之半;  $\sigma = 2\pi/\text{波浪周期}$ ,  $k = 2\pi/\text{波长}$ ,  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 为上下层流体的深度和密度。

由于理想流体的运动无能量损耗, 也就不涉及到波浪的沿程衰减问题, 因此, 可认为上述解答是完满的。

对于上层是理想流体、下层是粘性流体的情况, Gade (1958, 1959) 可算得上一个先驱者。他的理论工作, 主要是为了研究波浪的能量损耗、沿程衰减, 以及表面波与界面波的位相差等, 由于他使用了长波假定, 从而使其解的应用范围受到了很大的限制。

Darlymple (1978) 的论文, 重点是探讨了上、下层均为粘性流体的情况, 并假定表面波为过渡水深波。因此, 有理由认为, 上述Gade的解答, 可被看成是他的解答的一种特殊情况。根据Darlymple的计算比较表明, 在长波理论可用的范围内, 由Darlymple的理论得出的计算结果和由Gade的理论得出的计算结果实质上是相同的。这表明当上层流体的粘性很小时, 把上层流体看成理想流体会使问题的处理得以简化, 且不致造成太大的误差。

Darlymple只是列出了基本方程式和边界条件, 未能求出问题的解析解。其原因与他对波长的表达取复数形式有关。

笔者从Gade和Darlymple的上述论文中得到启发, 分析了上层为理想流体、下层为粘性流体的情况, 并假定表面波为过渡水深的波浪, 波长为实数。笔者通过理论推导, 得出了界面波振幅、上层和下层流体中的水平和垂直轨迹速度、上层和下层流体中的质量输送的解析解。由于假定上层流体为理想流体, 这就使水平轨迹速度和传质速度在交界面处无法保持连续, 这和挡土墙所承受的土压力计算中有些相似。即, 如果土壤是分层的, 上、下二层的内摩擦角不同, 则在上、下二层的交界面处算出的土压力是不连续的, 而实测得到的土压力则是连续的, 但在该交界面附近压力的变化梯度较大。在水体与浮泥层之间存在着清楚的交界面的情况下, 实验室和现场的实测资料都已经表明, 上层水体的含沙量很小, 故其粘性很小, 根据流体力学理论可以知道, 如果参数  $\frac{\sigma^2}{g} \left( \frac{\nu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$  很小, 则流体的运动除了在交界面附近以外, 实际上可被看成是无涡的, 也即粘性效应主要反映在边界层里 (上式中的  $\nu$  代表上层水体的粘性系数)。因此, 为了使方程

的解能从物理上得到更好的解释，需引进一个活动边界层，即把上层水体划分为两部分，其上面的极大部分为理想流体，且运动为有势的，在接近交界面的薄层水体，为粘性边界层，粘性系数取上层水体的数值。对下层流体（即浮泥），则看成是另一种粘性流体，并采用相对应的粘性系数。这一课题，已由我校研究生杨振勇在笔者的指导下完成。

Mallard和Darlymple (1977) 曾把海床作为弹性体处理，因为他们没有考虑浮泥的粘性，所以不能体现出泥层对波浪衰减的影响。

Hsiao和Shemdin (1980) 把上层水体作为理想流体，把下层浮泥作为粘弹性体，从而得出了一些结果，使前述波浪沿程剧烈衰减的事实得以解释。该理论结果的主要问题是：把泥层作为粘弹性体，可能只能相应于泥层已达到相当固结的情况才可这样近似处理，此时，泥层实际上已无多少流动性，它已经不属于我们所讲的浮泥的范畴了。

把下层流体（即浮泥层）作为塑性流体看待，从物理上看，这是最接近实际的。据笔者所知，这一问题，在国际上还无人在理论上作出过处理。笔者早年曾以半经验的途径对比进行过探讨，并曾在英文版海洋文集（1983）中作过报道。按笔者现在来看，上述处理的物理依据是不足的。我校研究生戴桂海在笔者的指导下，初步完成了这一工作。

理论处理假定：上层水体除邻近水、泥交界面处的薄层外，都是理想流体。其运动是有势的，上述薄层为粘性边界层；其粘性用上层水体的粘性系数来表达，下层为塑性流体，采用由剑桥大学 Oldroyd (1947) 导出的三元不定常运动的塑性流体动力方程，并把它简化。理论推导得出了界面波振幅，上、下层流体中的水平、垂直轨跡速度和波浪的色散关系。由于此动力方程非常复杂，只好采用逐次逼近的办法求解。应该承认，其数学处理上确有待改进之处，但就分层流体中的波浪运动这一课题来说，上述成果是走在前列的。看来，这一课题的今后研究的目标，似乎是应把上层水体都作为粘性流体处理，但这在数学上将更为复杂。

### (三)

事实上，只是为了处理上的方便，才把浮泥层作为均质流体处理，并以沿泥深平均的容重及与此对应的物理力学参数来表征该层浮泥的特性。目前看来，要把泥层的不均匀性引入问题的力学分析之中，则是难于做到的；从解决工程问题的目的来看，似乎也无此必要。但是，当泥和水经自然因素（如波浪）或人工搅浑后，在没有自然因素或人工搅拌的情况下，浮泥层的平均容重的历时变化规律，是急需知道的。因为，只有把此问题也解决后，才有希望和其它的力学分析结合在一起去解决工程实践问题。我们的实验室的测量已经发现，当水、泥被人工搅浑后，一旦这种搅拌停止，过一定时间，由于泥的下沉，出现一个清楚的泥和水的交界面，此时，交界面附近的浮泥的容重大致为 $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ 左右。随着时间的推移，泥面逐渐下沉，这表示泥层的平均容重逐渐增大，但交界面附近的浮泥容重却近似不变。当然，实验是在特定的条件下进行的，并没有数值规律上的普遍意义。只有在找出理论解，揭露内在联系的规律后，问题才算解决。交界面的稳定性问题，也即交界面的破碎条件，不仅有理论价值，并且有现实意义。因为，只有在交界面被破碎后，才能有大量的泥沙悬浮。我们因限于设备条件，试验所用的波浪是不破碎的，实验中也没有观察到交界面的破碎。到目前为止，还没有依据可说明在表面波继续增大（即主要是波高增大）、但未达破碎的情况下，界面波一定不破碎。

业经从实验观察中查明，浮泥层内的流体质点运动和水波中的流体质点运动很相似，即其轨跡近似为一个椭圆，长、短半轴均由交界面向下递减，但短半轴递减得更快。关于浮泥层内的水平最大轨跡速度及它的沿深度的分布，已由笔者的研究生们测得，其实测值和两种理论值（即

假设下层为塑性流体或粘性流体) 均比较接近。按一般规律说, 如假定下层为塑性流体, 其结果和实验的一致性稍好些(与假定下层为粘性流体的比较), 就实测的波长和计算波长来说, 其结果也是这样。界面波的数值, 我们也曾进行过量测, 结果表明, 计算值和实测值为同一量级, 因为界面波的数值很小, 难于测准, 故就各个数据来说, 有的计算值和实测值之间的相对误差较大, 但总体平均来看, 彼此差不多。

为了能求得波高沿程衰减的规律, 有些学者在理论分析中假定波长为复数, 并据此导出表面波与界面波的位相差。因为界面波的振幅很小、波形平坦。限于设备条件, 我们还没有把它测出来。