

沉积性海岸潮汐海口的稳定性

赵今声

(天津大学)

海口是沿海泻湖或海湾通向外海的门口。当这些泻湖及海湾有内河汇入时，从水动力学角度来衡量，与河口并无区别。海口的淡水迳流流量一般较小，泥沙来源主要是海沙。沉积性海岸的海口稳定性包括了断面和平面位置的稳定性。本文主要讲断面的稳定性。研究海口的稳定性则首先要研究海口潮汐水力学。

一、海口潮汐水力学

海口水流主要是外海及泻湖（或海湾）潮位差引起的不稳定潮流，其强度与泻湖面积、外海与泻湖之间的潮位差的大小及海口水道特性等因素有关。在有明显的潮流水道情况下，海口水流可按一维问题处理，因水道较窄，柯氏力及横向水流可略去不计。潮波的一维运动方程式为

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{v|v|}{c^2 R} = 0 \quad (1)$$

其中的 v 为断面平均流速； x 为沿着水道的距离； η 为水位； R 为水力半径； c 为谢才系数； t 为时间； g 为重力加速度。

假定外海及泻湖中的潮波曲线都是正弦曲线，外海潮汐振幅为 a_0 ，泻湖潮汐振幅为 a_B ，则外海潮差为 $2a_0$ ，泻湖潮差为 $2a_B$ 。外海潮位 η_0 与时间 t 的关系为

$$\eta_0 = a_0 \cos \sigma t \quad (2)$$

$\sigma = 2\pi/T$ ， T 为潮周期。泻湖发生高潮和低潮的时间均较外海滞后 ε 小时（图 2）。对于半日潮型， $T = 12.42$ 小时， ε 可按每小时折合成 29° 。从图 2 可知，泻湖的潮汐振幅为

$$a_B = a_0 \cos \varepsilon \quad (3)$$

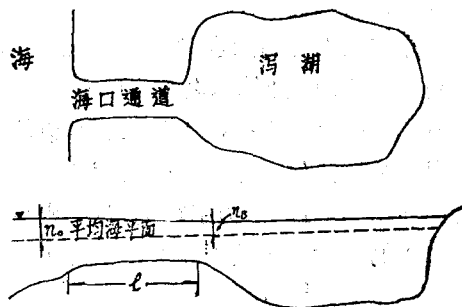


图 1 海口示意图

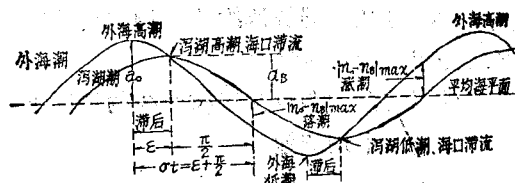


图 2 外海及泻湖潮汐示意图

泻湖潮位 η_B 与时间 t 的关系为

$$\eta_B = a_B \cos(\sigma t - \varepsilon) = a_0 \cos \varepsilon \cos(\sigma t - \varepsilon) \quad (4)$$

在任何瞬时海口水道内外两端的水位差为

$$\begin{aligned} \eta_0 - \eta_B &= a_0 \cos \sigma t - a_0 \cos \varepsilon \cos(\sigma t - \varepsilon) \\ &= a_0 [\cos \sigma t - \cos \varepsilon \cos(\sigma t - \varepsilon)] \end{aligned} \quad (5)$$

憩流发生在 $\sigma t = \varepsilon$ ，此时 $\eta_0 - \eta_B = 0$ 。外海高潮以后 $\sigma t = \varepsilon + \pi/2$ 发生最大落潮流，外海低潮以后 $\sigma t = \varepsilon + \pi/2$ 发生最大涨潮流，这时候， $(\eta_0 - \eta_B)_{max} = a_0 \sin \varepsilon$ （图 2）。

忽略方程（1）中的第一、二两项，但考虑海口进出口的水头损失，可得

$$\eta_0 - \eta_B = \frac{1}{2g} \left(k_1 + k_2 + \frac{fL}{4R} \right) v|v| \quad (6)$$

式中 k_1 、 k_2 分别代表通道进口及出口的能量损失系数， f 为达西—韦斯巴赫摩擦系数， L 为

与通道水流均匀断面A相当的通道长度, R为均匀断面 A的平均流速。能量损失系数之和

$$k_1 + k_2 + \frac{fL}{4R} = F \quad (7)$$

其中 $k_1 + k_2 = 1$, f 与曼宁系数 n 有下列关系

$$n = 1.48R^{\frac{1}{6}}(f/8g)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

对于沙质水道, f 值变化于 0.01至0.07 之间, 与最大流速及潮位有关。在缺乏资料的情况下, 可取 $f=0.03$ 。

海洋与泻湖之间的水道断面一般并不均匀, 用均匀断面 A计算与之相当的水道长度 L , 应使概化后的水道水头损失与天然水道的水头损失保持相等。如实际水道的长度为 x_L , x 点的断面面积为 A_x , 水力半径为 R_x , 则对于有明确边界的水道, 可按下述关系估算 L

$$L = \int_0^{x_L} \left(\frac{R}{R_x} \right) \cdot \left(\frac{A}{A_x} \right)^2 dx \quad (9)$$

水道长度 x_L 可从每端流速约为平均水道流速的 20% 之处起沿着轴线计量。

在外海与泻湖潮汐为正弦曲线的情况下, 海口断面最大平均流速为

$$\bar{V}_{max} = \left[\frac{2ga_0 \sin \epsilon}{F} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

因水道的摩擦阻力与流速的平方成正比, 泻湖潮汐不可能是正弦曲线。库利根考虑到这一点, 并保留了方程 (1) 的第二项, 从而导出泻湖潮汐滞后时角 ϵ 、泻湖与外海潮波振幅比值 a_B/a_0 、水道无尺度最大流速 V'_{max} 这三个参量与一个无尺度系数 K 的关系。这个系数 K 称为“饱满系数”。

$$K = \frac{T}{2\pi a_0} \cdot \frac{A}{A_B} \cdot \frac{\sqrt{2ga_0}}{\sqrt{F}} \quad (11)$$

上述三个关系绘成图 3 的曲线。水道无尺度最大流速 V'_{max} 的定义是

$$V'_{max} = \frac{\bar{V}_{max}}{\bar{V}} = \bar{V}_{max} \cdot \frac{TA}{2\pi a_0 A_B} \quad (12)$$

式中 \bar{V} 为一个潮周期内的通道涨潮或落潮平均流速, \bar{V}_{max} 为通道平均流速的最高值, A_B

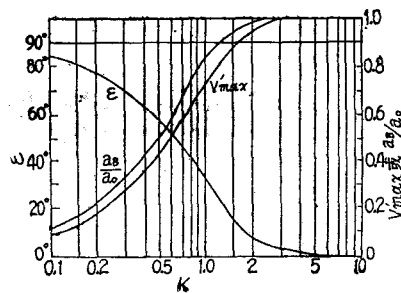


图 3 饱满系数 K 与 ϵ 、 V'_{max} 及 a_B/a_0 的关系

为泻湖水面面积。

如潮周期远大于潮波从海口传到泻湖内最远点所需的时间, 可假定泻湖潮差不变, 再假定泻湖水面面积不因潮汐涨落而变化, 则泻湖的纳潮量应为

$$P_V = 2a_B A_B \quad (13)$$

上述两个假定不完全符合实际情况, 故算得的纳潮量常含有较大误差。库利根对涨潮期间的流量进行积分, 得纳潮量

$$P_H = \frac{\bar{V}_{max} AT}{C_k \pi} \quad (14)$$

C_k 为系数, 变化在 0.81—1 之间, 库利根取为 0.8, 算得的纳潮量很接近实测值。 P_H/P_V 可大于或小于 1, 最大可达到 2。

为了确定上述各公式中的常数, 比较理想的方法是:

1. 在海口通道的咽喉断面 (断面面积最小) 测量流速, 确定外海高潮及低潮水位后发生憩流的时间和涨急落急的咽喉断面 A 的平均流速 \bar{V}_{max} 。

2. 同时在不受海口进出水流影响的外海及泻湖中测量潮汐水位。

3. 在作流速测量时, 要测量水道地形。

从外海高潮及低潮水位后发生憩流的时间, 算得泻湖潮汐滞后时角 ϵ , 从图 3 确定饱满系数 K 的数值。计算泻湖和外海潮汐振幅比 a_B/a_0 , 从图 3 确定 K 。两个 K 值应近似相等。利用测量值 \bar{V}_{max} 、 a_0 和 ϵ , 从方程 (10) 计算 F 。 F 代表了水道中所有的阻力因素。 F 亦可利用 K 值、从方程 (11) 算得。

$$\begin{aligned}
 F &= \left[\frac{T}{2\pi a_0} \cdot \frac{A}{A_E} \cdot \frac{\sqrt{2ga_0}}{K} \right]^2 \\
 &= \left[\frac{T}{\pi} \frac{\sqrt{2ga_0} \cos \varepsilon}{K} \frac{A}{P_v} \right]^2 \\
 &= \left[\frac{T}{\pi} \frac{\sqrt{2ga_{0m}} \cos f}{K} \frac{A}{P_m} \right]^2 \quad (15)
 \end{aligned}$$

式中 a_{0m} 代表外海潮汐的平均振幅， P_m 代表与之相当的纳潮量。大潮纳潮量 P_s 与平均纳潮量 P_m 之间有下列关系

$$P_m = P_s \left[\frac{a_{0m}}{a_{0s}} \right]^n \quad (16)$$

a_{0s} 为外海潮汐大潮平均振幅； $0.5 < n < 1.0$ ，与饱满系数 K 值有关。

从水道测量可得到水力半径 R 。如 $k_1 + k_2$ 和 f 能够估计，则与全长为均匀断面相当的水道长度可按下列式估计

$$L = \{F - (k_1 + k_2)\} \frac{4R}{f} \quad (17)$$

二、海口断面的稳定性

在有沿岸流和沿岸输沙的海岸，海口通道的平面和横断面几何形状不断变化。有些海口被泥沙堵塞而消逝，有些则逐渐衰减而最终被泥沙填平。在旧海口堵塞之后，泻湖与外海间的沙坝在另一个地点被冲开，又产生一个新海口。有些海口始终能保持畅通，并具备一定的水流横断面面积，这些海口处于动力平衡状态，是稳定的。在稳定海口，水流虽然能保持一定断面面积，但水道的平面位置并不一定稳定，有些水道也在不断滚动。

检验海口横断面是否稳定，有以下几种方法：

(一) 海口的平衡横断面面积 奥勃朗对美国的沙质海岸海口进行了大量调查研究，包括经过整治的有导堤海口和无导堤天然海口，找到了稳定海口的咽喉断面面积 A_E （从平均海平面计）与大潮情况下泻湖进潮量 P_s 间的关系，如图4的曲线所示（单位分别为平方英尺及立方英尺）。

海口涨落潮水流既能冲刷水道，扩大它的横断面面积，同时也能将所挟泥沙部分丢弃在水道之内，减小它的横断面面积。海口咽喉横断面面积 A_E 是水流长期作用的结果，可以认为是平衡横断面面积。

(二) 海口水道的临界横断面面积 对于一定的泻湖纳潮量，水道最大平均流速 \bar{V}_{max} 随着水道横断面面积及形状而变化。图5代表一个范例，在临界横断面面积 A^* 的情况下， \bar{V}_{max} 达到峰值，这时

$$\frac{\partial \bar{V}_{max}}{\partial A} = 0$$

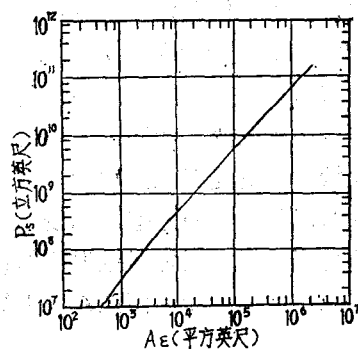


图4 平衡断面面积 A_E 与大潮纳潮量 P_s 的关系

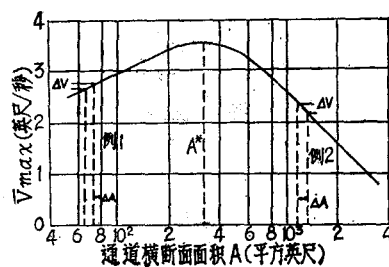


图5 通道横断面面积 A 与最大平均流速 \bar{V}_{max} 的关系

在峰值的右方， $A > A^*$ ，当异常大的沿岸输沙被带进海口时，通道横断面面积减小，但水流速度增加；由于冲刷力加强，使通道恢复原有横断面，所以通道是稳定的（参看图5例2）。在峰值的左方， $A < A^*$ ，通道断面面积减小，水流速度也减小，由于淤积增加而使断面面积继续减小，所以通道有可能完全堵塞，而呈不

稳定状态（参看图5的例1）。 A^* 代表了稳定和不稳定横断面面积的分界，所以被称为临界横断面面积。稳定横断面面积区的特点是横断面面积的减小能引起水流速度的增加，不稳定横断面面积区的特点则是由于断面的减小（水力半径 R 减小）而引起摩擦阻力的增加。

因为潮差在不断变化，无论是平衡横断面面积或临界横断面面积，都必须和某种平均潮差情况联系起来。如果和 A^* 相当的最大平均流速 \bar{V}_{max} 小于泥沙的起流速，则在落潮时不能冲走淤积的泥沙，通道趋向堵塞。排入泻湖的淡水径流可以加强通道落潮水流，所以能加强海口的稳定性。

现在我们讲如何确定一个海口的临界横断面面积 A^* 。海口通道淤积的方式与横断面面积的减少有密切关系。如果主要是边坡淤积，则水力半径很少改变，和底床淤积而宽度不变的情况比较，水流速度改变较少。当横断面面积减少的情况相同，而通道淤积段长度不同时，影响也不一样。假定通道淤积的情况如图6所示，减小后的横断面面积 A 与平衡横断面

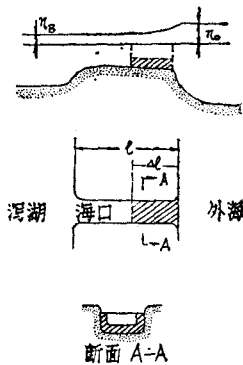


图6 海口的淤积型式

面积 A_E 在几何上相似，并假定

$$A = KA_E \quad (18)$$

K 是面积折减系数。减小后的横断面水力半径 R 与平衡断面的水力半径 R_E 之间应具有下述关系

$$R = \sqrt{KR_E} \quad (19)$$

假定淤积段的长度为 ΔL ，则淤积发生后的饱满系数

$$K = \frac{T}{2\pi a_0} \cdot \frac{A_E}{A_B} \times \sqrt{\frac{\sqrt{2ga_0}}{k_1 + k_2 + \frac{f\Delta L}{4\sqrt{KR_E K^2}} + \frac{f(L-\Delta L)}{4R_E}}} \quad (20)$$

假设泻湖纳潮量不变，通道断面减小，使平均流速增加，因而进出口和摩擦水头损失增加，故在上式中用 K^2 除了 k_1 、 k_2 和淤积段的 f 。在不确切知道泻湖水面积 A_B 的情况下，亦可利用 A_E 从图4查 P_S ，然后从 $P_S = 2a_B A_B$ 这个关系式计算 A_B 。 $2a_B$ 应采用大潮时的泻湖潮差。

多数天然海口的淤积长度 ΔL 可取为300米。假设不同的 K 值，用(18)式计算 A ，用(20)式计算 K ，从图3查 V'_{max} ，然后用(12)式计算 \bar{V}_{max} 。绘制 A 与 \bar{V}_{max} 的相关曲线（如图5）。从曲线确定临界横断面面积 A^* 。如 $A_E > A^*$ ，则海口是稳定的，否则就是不稳定的。

(三) 通道的大潮最大断面平均流速 海口通道泥沙主要来自外海，沿岸输沙量愈大，涨潮时带进通道的泥沙愈多。落潮流速和流量愈大，从通道冲出的泥沙愈多，断面愈易保持，所以通道落潮流速、泻湖纳潮量和沿岸输沙量是与通道稳定性有关的参量。

在沙质冲积海岸的海口，底沙平均粒径一般为0.15—0.30毫米，这样的沙在近底平均流速达到约0.3米/秒时开始运动，并形成沙波。当流速超过约0.6米/秒时，沙波开始向沙丘发展。当流速增到0.9—1.2米/秒时，几乎变成平底。平底的摩擦阻力最小，水流的剪切应力可充分用于冲刷泥沙。例如，在某海口当流速从0.5米/秒增到1.0米/秒时，近底含沙浓度从百万分之100增到百万分之3000，推移质输沙量与流速的五次方成正比。

勃鲁恩对11个海口的特性进行了分析，它们的通道水力半径（平均水深）变化范围为2.5米—15米，但它们的大潮最大断面平均流速 \bar{V}_{max} 仅差10—20%。大自然做了巧妙的安排：当需要输送较多的泥沙时，水流速度增加

到摩擦损失最小的数值。勃鲁恩分析过8个美国海口、6个荷兰海口和一个丹麦海口，它们有的是天然海口，有的建筑了两条导堤，通道平面位置有稳定的，也有不断滚动的，但通道水流横断面都是稳定的。它们的大潮最大断面平均流速为1.00—1.08米/秒，这可被认为是保持通道水流断面的必要速度。大潮最大断面平均流速（米/秒）与水力半径R（米）之间有下列经验关系

$$R \geq 5 \text{ 米, } \bar{V}_{\max} = R^{1/8} - 0.2 \quad (21)$$

$$R < 5 \text{ 米, } \bar{V}_{\max} = R^{1/8} - 0.1 \quad (22)$$

这里必须指出，勃鲁恩采用的大潮最大断面平均流速 \bar{V}_{\max} 是在大潮期间发生最大流速前后2—3小时内的断面平均流速，这时的流速为最大流速的85—100%，大潮潮差比平均潮差一般高30—50%，大潮最大流速时的推移质输沙量比平均潮差情况下可能大两倍。在一个太阴月28天内，通道可能在小潮期间发生淤积，在大潮期间发生冲刷。因此，在研究海口的稳定性时，应特别重视大潮最大平均流速。

以上论述并不限于有简单几何形状的海口，有些海口的横断面是复杂的，甚至在咽喉断面也存在着几条落潮和涨潮水道。

(四) 泻湖大潮纳潮量 P_s 与每年沿岸输沙量 M 之比 P_s/M 每年沿岸总输沙量代表海口以外泥沙运动的激烈程度，可以说是进入海口通道泥沙数量大小的指标。泻湖在大潮时期的每潮纳潮量 P_s 代表大潮落潮水流的冲刷能力。勃鲁恩建议用 P_s/M 比作为检查海口稳定性的指标，他对美国、荷兰、印度、丹麦的港口进行了分析比较，认为：当 $P_s/M > 150$ ，海口情况较令人满意和稳定；当 $100 < P_s/M \leq 150$ ，情况较好；当 $50 \leq P_s/M \leq 100$ ，情况在较好和不好之间；当 $P_s/M < 50$ ，情况较坏。好坏标准主要指的是咽喉断面能否维持一定的面积和深度。在不好和较坏的情况下，咽喉断面不稳定，有时甚至可被泥沙封死，海口外有拦门沙，沙顶水深较浅；在较坏的情况下，连渔船都不能出入。潮汐不仅在每个月有大小潮变化，在一年内还有季节变化，春分及秋分潮汐

特大。在受季节风影响的海岸，风季常发生特大潮，如我国广东、福建、浙江等省的台风暴潮。沿岸输沙的季节变化一般大于大潮纳潮量的季节变化，两者的变化可以是同步的，也可能是不同步的。在季节变化较大的情况下，最好分季计算 P_s/M 值。

海口断面稳定性的检验程序可总结如下：

1. 搜集海口以外的海洋最大潮差 $2a_0$ 和泻湖内靠近海口处的最大潮差 $2a_B$ 。测量海口咽喉断面面积 A_E 。在咽喉断面测量流速，确定外海高潮及低潮水位后发生憩流的时间以及涨急和落急时的断面平均流速 \bar{V}_{\max} 。

计算泻湖潮汐滞后时角 ϵ 。在找不到 $2a_B$ 的情况下，亦可用 $2a_B = 2a_0 \cos \epsilon$ 进行计算。

2. 利用滞后时角 ϵ 之值，从图3查饱满系数 K ；亦可利用 a_B/a_0 之比，从图3查 K 。两个 K 值应近似相等。

3. 利用咽喉断面面积 A_E ，从图4查泻湖大潮纳潮量 P_s 。

4. 从下列关系计算泻湖有效水面面积 A_B ：

$$P_s = 2a_B A_B$$

5. 利用饱满系数 K ，从图3查无尺度最大流速 V'_{\max} ，然后用下式计算大潮最大断面平均流速 \bar{V}_{\max}

$$\bar{V}_{\max} = V'_{\max} \frac{2\pi a_0}{T} \frac{A_B}{A}$$

如果 $\bar{V}_{\max} \geq 1$ 米/秒，则咽喉横断面是稳定的。

6. 利用方程(10)计算水头损失系数 F ，利用方程(17)计算有效水道长度 L 。

7. 假定通道淤积长度 $\Delta L = 300$ 米，咽喉断面面积因淤积而减少的系数 $k = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1$ 等，用(20)式计算 K 。从图3查得 V'_{\max} ，然后用(12)式计算 \bar{V}_{\max} 。绘制通过横断面面积 A 与 \bar{V}_{\max} 的关系，定出临界横断面面积 A^* 。如果 $A_E > A^*$ ，则断面是稳定的，否则是不稳定的。

8. 估计海口处的每年沿岸输沙总量 M ，计算泻湖最大纳潮量 P_s 与 M 之比，据此对海口稳定性作出估计。

具有常值海底反射损耗的负声速梯度浅海中的平均声强

唐 应 吾

(中国科学院声学研究所)

负声速梯度浅海中的平均声强，在文献(1)中已做了一些研究。在那里我们把第 l 号简正波相应的“准平面波”在海底上的反射系数的模 $|v_l|$ 视为掠射角 $\alpha_l(H)$ 的指数下降函数：

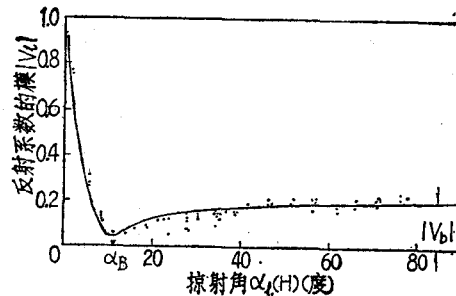
$$|v_l| = \exp[-2P\alpha_l(H)] \quad (1)$$

这只有在 $\alpha_l(H) > \sqrt{2\alpha H}$ ($\sqrt{2\alpha H} = \alpha_{l_1}(H)$ 为临界简正波所对应的“准平面波”在海底上的掠射角) 的某一角度范围内，(1)式成立或者近似成立才有可能，亦即当 P 值较大和海底中的吸收较大时，表式(1)是一个很好的近似；但当海底存在着贯穿角

$$\alpha_B \left[\alpha_B = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{n^2-1}{m^2+1}} \right) \right] \text{ 且 } \alpha_B <$$

$\sqrt{2\alpha(H-Z)}$ (这里的 $\sqrt{2\alpha(H-Z)} = \alpha_{l_1}(H)$ 为能够到达接收器的最低号简正波所对应的“准平面波”在海底上的掠射角。)时，表式

(1)不再成立。这时把 $|v_l|$ 视为与 $\alpha_l(H)$ 无关的常数—— $|v_b|$ ，就更为恰当些(图1)。



...实验值—理论值

图1 有贯穿角存在时 $|v_l|$ 对 $\alpha_l(H)$ 的关系 (取自文献[6])

此外当贯穿角不存在且 $P \ll 1$ 时(这种情况对应于高声速及低吸收海底)，海底的反射特性曲线如图2所示^[7]。

从图2可以看出，这种海底呈现出强反射区 ($0 < \alpha_l(H) < \alpha_A$) 和弱反射区 ($\alpha_A < \alpha_l(H) <$

The Stability of Tidal Inlets on Alluvial Coast

Zhao Zhinsheng

(Tianjin University)

Abstract

A synopsis on the stability of tidal inlet on alluvial coast is given. Part I outlines hydraulics of tidal inlet. Part II gives four considerations on investigating the stability of cross-section: 1. equilibrium cross-sectional area, 2. critical cross-sectional area, 3. mean maximum velocity of cross-section at spring tide, 4. relation between tidal prism of lagoon at spring tide and annual littoral drift. Finally the procedure for investigating cross-section stability is outlined.