

河川を遡上する高潮

神戸大学工学部 正 員 神田 徹
神戸大学大学院 学生員 ○ 兵村 吉昭

1. まえがき 本研究は、河川を遡上する高潮についてその基本的な遡上特性を、主に水位の変動を中心に明らかにしようとしたものである。このために、高潮とほとんど同じ遡上特性をもつと考えられる長周期性の連続波を対象として、理論的検討を行った。

2. 基礎方程式および境界条件 一次元非定常流の方程式において、慣性項を省略した次の運動方程式および連続式を用いる。

$$\partial R / \partial x = i - n^2 |U| U / R^{3/2} \quad (1), \quad \partial R / \partial t + \partial (R U) / \partial x = 0 \quad (2)$$

等流で流れる河川を長周期性の波が遡る場合を考え(図-1)、境界条件として河川下流端(河口)および無限上流地点の水深を次のように与える。

$$x=0 \text{ において } R = \frac{A_0}{2} (1 - \cos \frac{2\pi}{T} t) + R_0, \quad x=\infty \text{ において } R = R_0 \quad (3)$$

ここに、 A_0 : 河口における波の振幅、 T : 波の周期、 R_0 : 初期等流水深

3. 近似解とその構造 上式に対する解析解として、第1次近似解($A_0/2$)および第2次近似解($A_0^2/4R_0$)が次のように得られる。

$$R = R_0 + \frac{A_0}{2} g_1 + \frac{A_0^2}{4R_0} g_2 \equiv R_0 + \Delta H \quad (4)$$

$$g_1 = \exp\left(\frac{\omega}{2u} x\right) - \exp\left\{\left(\frac{\omega}{2u} - P_1\right) x\right\} \cos(\delta_1 t - \theta_1 x) \quad (5)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{\omega}{2u} x\right) - \exp\left(\frac{\omega}{2u} x\right) + D_0 \left[\exp\left(\frac{\omega}{2u} x\right) - \exp\left\{2\left(\frac{\omega}{2u} - P_1\right) x\right\} \right] \right. \\ \left. + D_1 \left[\exp\left\{\left(\frac{\omega}{2u} - P_1\right) x\right\} - \exp\left\{\left(\frac{\omega}{2u} - P_1\right) x\right\} \right] \cos(\delta_1 t - \theta_1 x + \theta_1) \right. \\ \left. + D_2 \left[\exp\left\{\left(\frac{\omega}{2u} - P_1\right) x\right\} \cos(2\delta_1 t - 2\theta_1 x + \theta_2) \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \exp\left\{2\left(\frac{\omega}{2u} - P_1\right) x\right\} \cos(2\delta_1 t - 2\theta_1 x + \theta_2) \right] \right] \quad (6)$$

$$\text{ここに、} \left(\frac{P_1}{\theta_1}\right) = \left\{ \left[\left(\frac{\omega}{2u}\right)^2 + \left(\frac{1}{4u}\right)^2 \right] \pm \left(\frac{\omega}{2u}\right)^2 \right\}^{1/2}, \quad \left(\frac{P_2}{\theta_2}\right) = \left\{ \left[\left(\frac{\omega}{2u}\right)^2 + \left(\frac{21}{4}\right)^2 \right] \pm \left(\frac{\omega}{2u}\right)^2 \right\}^{1/2}$$

$$\delta = \frac{\pi}{T}, \quad \omega = \frac{5}{3} v_0 (< 0), \quad \mu = \frac{R_0 v_0}{2x} (> 0), \quad v_0: \text{等流流速}$$

i : 河床勾配、 $D_0, D_1, D_2, \theta_1, \theta_2$: ω, μ, δ の関数

図-2 は $R_0 = 1.219$ (m)、 $v_0 = 0.82$ (m/sec) の流れを $A_0 = 1$ (m)、 $T = 1$ (hr) の波が遡るときの第2次近似解($A_0^2/4R_0$)の各項の値(上図)と第1次近似解($A_0/2$) g_1 と第2次近似解の和(下図)を示す。 g_1 の第1項は平均水面を、第2項はそれからの変動水位を表す。 g_2 の第1項および第2項は非振動項、第3項は基本振動項、第4項は倍振動項である。基本振動項がかなり大きい、倍振動項も無視できない。図-3 は河口における波のピーク間を基準とした各項のピークの遅れ角を示す。ここに、 $\delta_0 = \delta_1 x, \delta_1 = \delta_1 x - \theta_1$

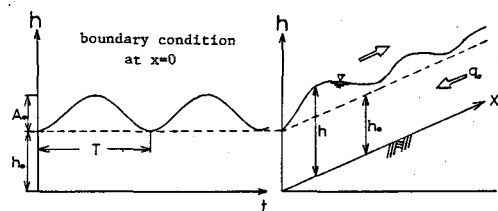


図-1 河道と境界条件

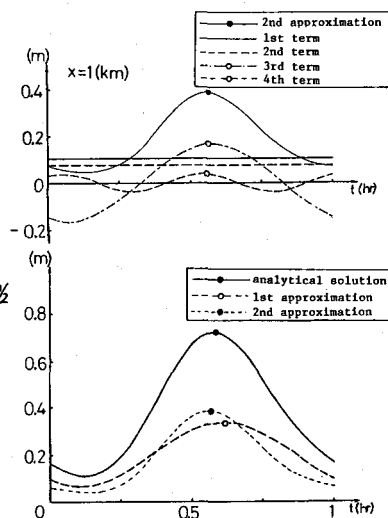


図-2 各項の時間変化

Tohru KANDA, Yoshiaki HAMAMURA

$\delta_2 = (\theta_2 x - \theta_2)/2$, $\delta_3 = \theta_1 x - \theta_2/2$ 。図より、倍振動項の遅れ角 δ_2 のみが他の δ に比べて小さく、上流に行くほどこれらの差が大きくなる。これが、河川遡上とともに波形の非対称性が増し、前面が急に、後面がゆるやかになるという波形変化をもたらすと考えられる。

4. 最高水位の伝播特性 上記の解析解にもとづき、最高水位の伝播におよぼす波の周期と河口振幅の影響について調った。

(4)~(6)式より各項の位相のずれを無視すれば、河道に右う最高水位は次式で表される。

$$\frac{\Delta H_{max}}{A_0} = \frac{1}{2} g_1 \max + \frac{1}{4} g_2 \max \quad (7)$$

$$g_1 \max = \exp\left(\frac{\omega}{2u}x\right) - \exp\left\{\left(\frac{\omega}{2u} - R\right)x\right\} \quad (8)$$

$$g_2 \max = \frac{A_0}{2} \left\{ \exp\left(\frac{\omega}{2u}x\right) - \exp\left(\frac{2\omega}{u}x\right) \right\} + D_0 \left\{ \exp\left(\frac{\omega}{2u}x\right) - \exp\left[2\left(\frac{\omega}{2u} - R\right)x\right] \right\} + D_2 \left\{ \exp\left\{\left(\frac{\omega}{2u} - R\right)x\right\} - \exp\left[2\left(\frac{\omega}{2u} - R\right)x\right] \right\} \quad (9)$$

上流端での河川流量を一定とした場合、上式より $g_1 \max$ および $g_2 \max$ の値は波の周期のみに影響される。周期が非常に長い場合および非常に短い場合に、それぞれ $g_1 \max$ および $g_2 \max$ が小さくなるため、両者の和が最大になるような波の周期が存在する。一方、相対波高が小さいほど最高水位の減衰が大きくなる。図-4はその計算結果を示す。

最高水位の伝播速度に関しては、倍振動項中の第1項が $(2u/\theta_2)$ で表され、その他の項はすべて (u/θ_2) で表される。これらの値は、波の周期が短いほど大きく、また、図-3からわかるように前者の方が後者よりも大きい。従って、波の周期が短いほど伝播速度は大きくなり、また、相対波高が大きいほど倍振動項の中の第1項が大きく影響し、伝播速度が大きくなるという。図-5は最高水位の生起時刻(河口の最高水位の生起時刻をも=0とする。)を T および A_0 をパラメーターとして表したものである。この図からも波の周期が短く、相対波高が大きいほど最高水位の生起時刻が早くなることわかる。

5. あとがき 本文では2次近似解にもとづき高潮の河川遡上特性を調ったが、この解の精度については講義時に述べる。

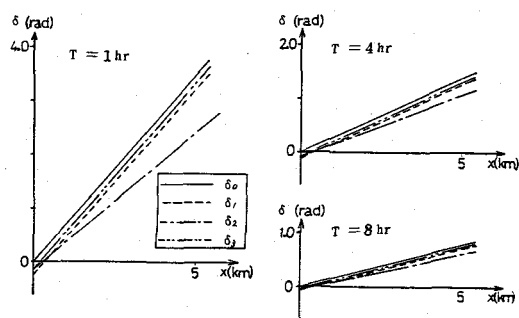


図-3 各項の遅れ角

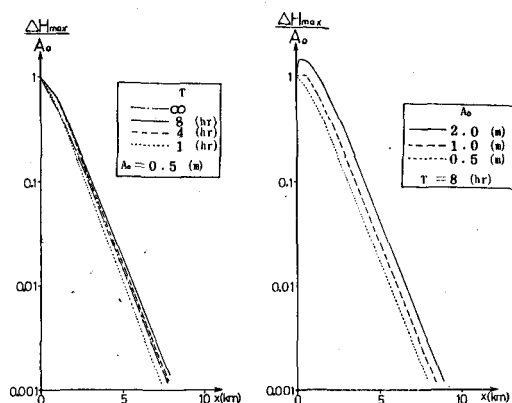


図-4 河道に右う最高水位

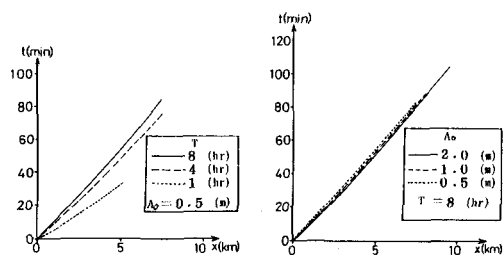


図-5 最高水位の伝播