

河川感潮部における長周期水位変動の解析

ANALYSIS OF VARIATION OF RIVER WATER LEVELS IN THE TIDAL REACH

神田 徹*・浜村吉昭**

By Tohru KANDA and Yoshiaki HAMAMURA

Analytical solutions with respect to variation of river water levels in the tidal reach are presented for such boundary condition that the tidal oscillations of long period are given at a river mouth. The solutions are the approximate ones of the third order which are derived by a perturbation method and have the satisfactorily high accuracy compared with the ones of the second order. Based on those solutions, the relationships are theoretically investigated between the highest water levels along river channel and the hydraulic parameters, namely, amplitude and period of tidal oscillation at river mouth, river-bed solpe and river discharge. Highest water levels are also compared with water levels of the steady nonuniform flow when the water level at river mouth is kept constant at the peak level of tidal oscillation, in order to examine how safe it is to adopt the water level of nonuniform flow as the design high water level.

Keywords: tidal river, water level, unsteady flow, perturbation method

1. ま え が き

感潮河川の計画高水位は従来、洪水と高潮が全く独立に生起するものとして定められている。すなわち、堤防設計のために必要な計画水位としては、基本的には上流部は洪水のみを、下流部は高潮のみを対象とした高水位をそれぞれ採用し、感潮部上流端で両水位を接続させることとしている。しかし、中小規模の洪水および高潮を含めて両者の同時生起性を調べると、台風来襲時の降雨と高潮はかなり短い時差で起こるといふ事は明らかであり¹⁾、また近年、流域の都市化とともに出水の遅れが著しく短縮していることに注目すれば、今後の河川計画・管理においては洪水と高潮の同時生起性を十分考慮に入れる必要がある。このことに関して、同時生起を考慮した計画高水位として計画潮位に対する計画洪水流量の不等流水面をとれば、それは計画上、確実に安全側であるのか、あるいは現実的には安全度が過大になるのではないかという問題がある。

本研究はこのような問題に関する基礎的研究として、

河口で長周期の水位変動を与えた場合の河道内の水位について解析解を導出し、それに基づいて感潮部の水位と河口水位変動の周期・波高、河川流量、河床勾配との関係を明らかにする。さらに、この不定流による最高水位と河口で水位変動のピークを保った場合の定常不等流水位との比較を行って、河川感潮部の計画高水位決定に対する理論的知見を得ようとするものである。

本研究に関連する感潮部の流れを対象とした研究としては、高潮の河川遡上を取り扱った理論的研究^{2),3)}・実験的研究^{4),5)}や潮汐の影響を受ける河川流を取り扱った研究^{6)~9)}が過去のある時期に強力に遂行され、これらの研究がわが国の防潮堤・防潮水門等の計画・設計に役立てられたことは周知のとおりである。洪水と高潮が同時に生起するときの河川流を対象にした研究もその後行われているが^{1),10),11)}、ここでは種々の水理条件を組み込んだ解析が必要になるので、電算機による数値計算が主たる解析手法となり、実際問題への適用範囲を拡大する方向に研究が展開されている¹²⁾。しかし一方では、海水の侵入・混合の問題を含めて感潮部の流れの挙動について現象的に未解明の部分も残されており、実証的あるいは実験的研究も行われている^{13)~15)}。

本研究の取り扱いのような理論的検討に関しては、上述の岡本⁶⁾、矢野ら¹⁰⁾の研究以後は数値解析が主流になっ

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科
(〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

** 正会員 工修 神戸市土木局
(〒650 神戸市中央区加納町 6-5-1)

たことによると考えられるが、ほとんど進展のないまま今日に至っている。彼らは、一次元不定流の基礎式において摩擦抵抗項を平均流速の一次式で近似して、摂動法により第二次近似解を得ている。本研究では、より厳密な解をもとに感潮部の流れの諸特性を調べるために、Manning 型の抵抗式を用いて第三次近似の摂動解を求める。

2. 水位変動の解析解

(1) 基礎方程式および境界条件

一様な広幅長方形断面の河道において河道内の流れを一次元流として扱えば、基礎方程式は次式で与えられる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + I + \frac{n^2 v |v|}{h^{4/3}} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h ：水深、 v ：断面平均流速、 q ：単位幅流量 ($q = vh$)、 I ：河床勾配； $I = h_0/l$ 、 h_0 ：単位幅流量 q_0 に対する等流水深、 q_0 ：無限上流端の流量 (一定)、 l ：河床高が h_0 になる地点までの河口からの距離。 x 軸は Fig. 1 のように河口を原点として上流へ向かう方向を正とする。したがって、流れが順流のとき v 、 q の値は負である。

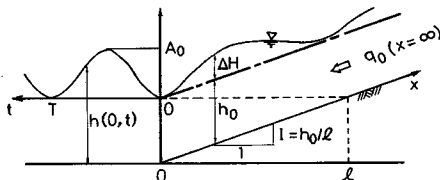


Fig. 1 River channel and boundary condition.

境界条件は、高潮あるいは潮汐による河口水位の変動を想定して、河川下流端 ($x=0$) での水深および無限上流での水深、流量を次のように与える。

$$h(0, t) = \frac{A_0}{2} \left[1 - \cos \left[\frac{2\pi}{T} t \right] \right] + h_0 \dots\dots\dots (3)$$

$$h(\infty, t) = h_0, \quad q(\infty, t) = q_0$$

ここに、 A_0 ：河口における水位変動 (波) の波高、 T ：波の周期。

式 (1)、(2) の諸量を次の関係；

$$\left. \begin{aligned} x' &= x/l = Ix/h_0, \quad t' = t/T_0, \quad T_0 \equiv l/\sqrt{gh_0} \\ v' &= v/\sqrt{gh_0}, \quad h' = h/h_0 \\ q' &= q/(h_0\sqrt{gh_0}) = h'v' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

を用いてプライムを付した無次元量に変換し、両式を書き直せば、

$$\frac{\partial v'}{\partial t'} + v' \frac{\partial v'}{\partial x'} + \frac{\partial h'}{\partial x'} + 1 + I_n \frac{v' |v'|}{h'^{4/3}} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial h'}{\partial t'} + \frac{\partial (h'v')}{\partial x'} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $I_n = gn^2/(h_0^{1/3}I) = gh_0^3/q_0^3 = h_0^3/h_c^3$ 、 h_c ：限界水深。

式 (5) において慣性項 (第 1 項および第 2 項) を省略すれば、

$$v' = \pm \frac{h'^{2/3}}{\sqrt{I_n}} \left[\mp 1 \mp \frac{\partial h'}{\partial x'} \right]^{1/2} \quad (\text{複号同順}) \dots\dots\dots (7)$$

また、等流については、

$$v'_0 = q'_0 = -1/\sqrt{I_n} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $v'_0 = v_0/\sqrt{gh_0}$ 、 $q'_0 = q_0/(h_0\sqrt{gh_0})$ 、 $v_0 = q_0/h_0$ ：等流流速

運動方程式として式 (7) を用いれば、この式と式 (6) から水位変動に関する基礎式が次のように得られる。

$$v' \geq 0 \text{ に対して}$$

$$\frac{\partial h'}{\partial t'} \pm \frac{5}{3\sqrt{I_n}} h'^{2/3} \left[\mp 1 \mp \frac{\partial h'}{\partial x'} \right]^{1/2} \frac{\partial h'}{\partial x'} - \frac{1}{2\sqrt{I_n}} h'^{5/3} \left[\mp 1 \mp \frac{\partial h'}{\partial x'} \right]^{-1/2} \frac{\partial^2 h'}{\partial x'^2} = 0 \quad (\text{複号同順}) \dots\dots\dots (9)$$

境界条件は、式 (3) より次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} h'(0, t') &= \frac{A'_0}{2} (1 - \cos \gamma t') + 1 \\ h'(\infty, t') &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $A'_0 = A_0/h_0$ 、 $\gamma = 2\pi/T'$ 、 $T' = T/T_0$ 。

式 (9)、(10) から、河道内の水深 h' はパラメーター A'_0 、 T' 、 I_n を含んだ x' 、 t' の関数として与えられる。

(2) 式 (9) の解

式 (9) (ただし、 $v' < 0$) に対する第三次近似の摂動解は次のようになる (解の誘導法については文献 16)、17) を参照)。

$$h' = 1 + \frac{A'_0}{2} y_1 + \frac{A'^2_0}{4} y_2 + \frac{A'^3_0}{8} y_3 \dots\dots\dots (11)$$

または、 $\Delta H' = \Delta H/h_0 = (h - h_0)/h_0$ とおけば、

$$\frac{\Delta H'}{A'_0} = \frac{1}{2} y_1 + \frac{A'_0}{4} y_2 + \frac{A'^2_0}{8} y_3 \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

$$\begin{aligned} y_1 &= \exp \left[-\frac{10}{3} x' \right] - \exp \left\{ -\left[\frac{5}{3} + p_1 \right] x' \right\} \\ &\quad \cdot \cos (\gamma t' - q_1 x') \dots\dots\dots (13) \\ y_2 &= \frac{13}{6} \left\{ \exp \left[-\frac{10}{3} x' \right] - \exp \left[-\frac{20}{3} x' \right] \right\} \\ &\quad + D_0 \left\{ \exp \left[-\frac{10}{3} x' \right] - \exp \left\{ -2 \left[\frac{5}{3} + p_1 \right] x' \right\} \right\} \\ &\quad + D_1 \left\{ \exp \left[-(5 + p_1) x' \right] - \exp \left\{ -\left[\frac{5}{3} + p_1 \right] x' \right\} \right\} \\ &\quad \cdot \cos (\gamma t' - q_1 x' + \theta_1) \\ &\quad + D_2 \left\{ \exp \left[-\left[\frac{5}{3} + p_2 \right] x' \right] \cos (2\gamma t' - q_2 x' + \theta_2) \right\} \end{aligned}$$

$$-\exp\left\{-2\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right\}\cos(2\gamma t'-2q_1x'+\theta_2)} \dots\dots\dots(14)$$

$$y_3=D_{01}\left\{\exp\left[-\frac{10}{3}x'\right]-\exp\left[-\frac{20}{3}x'\right]\right\}+D_{02}\left\{\exp\left[-\frac{10}{3}x'\right]-\exp(-10x')\right\}$$

$$+D_{03}\left\{\exp\left[-\frac{10}{3}x'\right]-\exp\left[-2\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]\right\}+D_{04}\left\{\exp\left[-\frac{10}{3}x'\right]-\exp\left[-2\left[\frac{10}{3}+p_1\right]x'\right]\right\}$$

$$-D_{11}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]-\exp\left[-(5+p_1)x'\right]\right\}\cos(\gamma t'-q_1x'+\theta_{11})$$

$$+D_{12}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]-\exp\left[-\left[\frac{25}{3}+p_1\right]x'\right]\right\}\cos(\gamma t'-q_1x'+\theta_{12})$$

$$+D_{13}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]-\exp\left[-3\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]\right\}\cos(\gamma t'-q_1x'+\theta_{13})$$

$$-D_{14}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]\cos(\gamma t'-q_1x'+\theta_{14})-\exp\left[-\left[\frac{10}{3}+p_1+p_2\right]x'\right]\cos\left[\gamma t'-(q_2-q_1)x'+\theta_{14}\right]\right\}$$

$$+D_{21}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_2\right]x'\right]\cos(2\gamma t'-q_2x'+\theta_{21})-\exp\left[-2\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]\cos(2\gamma t'-2q_1x'+\theta_{21})\right\}$$

$$-D_{22}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_2\right]x'\right]\cos(2\gamma t'-q_2x'+\theta_{22})-\exp\left[-2\left[\frac{10}{3}+p_1\right]x'\right]\cos(2\gamma t'-2q_1x'+\theta_{22})\right\}$$

$$+D_{23}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_2\right]x'\right]-\exp\left[-(5+p_2)x'\right]\right\}\cos(2\gamma t'-q_2x'+\theta_{23})$$

$$+D_{31}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_3\right]x'\right]\cos(3\gamma t'-q_3x'+\theta_{31})-\exp\left[-3\left[\frac{5}{3}+p_1\right]x'\right]\cos(3\gamma t'-3q_1x'+\theta_{31})\right\}$$

$$-D_{32}\left\{\exp\left[-\left[\frac{5}{3}+p_3\right]x'\right]\cos(3\gamma t'-q_3x'+\theta_{32})-\exp\left[-\left[\frac{10}{3}+p_1+p_2\right]x'\right]\cos\left[3\gamma t'-(q_2+q_1)x'+\theta_{32}\right]\right\}$$

$$\dots\dots\dots(15)$$

$$\left[\begin{matrix} p_1 \\ q_1 \end{matrix}\right]=\left[\left\{\sqrt{\left(\frac{5}{3}\right)^4+4L_n\gamma^2}\pm\left(\frac{5}{3}\right)^2\right\}/2\right]^{1/2}, \quad \left[\begin{matrix} p_2 \\ q_2 \end{matrix}\right]=\left[\left\{\sqrt{\left(\frac{5}{3}\right)^4+16L_n\gamma^2}\pm\left(\frac{5}{3}\right)^2\right\}/2\right]^{1/2}$$

$$\left[\begin{matrix} p_3 \\ q_3 \end{matrix}\right]=\left[\left\{\sqrt{\left(\frac{5}{3}\right)^4+36L_n\gamma^2}\pm\left(\frac{5}{3}\right)^2\right\}/2\right]^{1/2}$$

$$\phi_1=\frac{3}{10}p_1, \quad \phi_2=\frac{3}{10}p_2, \quad \Psi_1=\frac{3}{10}q_1, \quad \Psi_2=\frac{3}{10}q_2 \text{ とおけば,}$$

$$D_0=[3+15\phi_1+10\phi_1^2]/[24\phi_1]$$

$$D_i=\sqrt{M_i^2+N_i^2}, \quad \theta_i=\tan^{-1}\left[-\frac{N_i}{M_i}\right] \quad (i=1, 2)$$

$$M_1=[3+36\phi_1+20\phi_1^2]/[12\phi_1], \quad N_1=\Psi_1\left[3-10\phi_1-20\phi_1^2\right]/\left\{12\phi_1\left[\frac{1}{2}+\phi_1\right]\right\}$$

$$M_2=[2-25\phi_1-10\phi_1^2]/[24\phi_1], \quad N_2=\Psi_1\left[2+5\phi_1+10\phi_1^2\right]/\left\{24\phi_1\left[\frac{1}{2}+\phi_1\right]\right\}$$

$$D_{01}=13[3+67\phi_1+10\phi_1^2]/[72\phi_1], \quad D_{02}=-715/108, \quad D_{03}=[3+51\phi_1+210\phi_1^2+220\phi_1^3+\frac{200}{3}\phi_1^4]/[48\phi_1^2]$$

$$D_{04}=-\left[52+\frac{1118}{3}\phi_1+700\phi_1^2+440\phi_1^3+\frac{400}{3}\phi_1^4\right]/\left\{96\phi_1\left[\frac{1}{2}+\phi_1\right]\right\}$$

$$D_{ij}=\sqrt{M_{ij}^2+N_{ij}^2}, \quad \theta_{ij}=\tan^{-1}\left[-\frac{N_{ij}}{M_{ij}}\right] \quad (i=1, 2, 3; j=1, 2, 3, 4)$$

$$M_{11}=\left[\frac{15}{4}+\frac{213}{4}\phi_1+\frac{1754}{3}\phi_1^2+1344\phi_1^3+780\phi_1^4+\frac{100}{3}\phi_1^5\right]/\left\{48\phi_1^2\left[\frac{1}{2}+\phi_1\right]\right\}$$

$$N_{11}=\Psi_1\left[\frac{15}{2}+\frac{161}{2}\phi_1-\frac{1070}{3}\phi_1^2-\frac{2560}{3}\phi_1^3-300\phi_1^4\right]/\left\{48\phi_1^2\left[\frac{1}{2}+\phi_1\right]\right\}$$

$$M_{12}=-\left[39+620\phi_1+\frac{5080}{3}\phi_1^2+\frac{6064}{3}\phi_1^3+760\phi_1^4\right]/\left\{12\phi_1\left[3+8\phi_1+8\phi_1^2\right]\right\}$$

$$N_{12}=\Psi_1\left[-39+17\phi_1+568\phi_1^2+\frac{4120}{3}\phi_1^3+1160\phi_1^4+\frac{800}{3}\phi_1^5\right]/\left\{12\phi_1\left[\frac{1}{2}+\phi_1\right]\left[3+8\phi_1+8\phi_1^2\right]\right\}$$

$$M_{13} = - \left[1 + \frac{250}{3} \phi_1 + \frac{2662}{3} \phi_1^2 + 3279 \phi_1^3 + \frac{14860}{3} \phi_1^4 + 2700 \phi_1^5 + \frac{800}{3} \phi_1^6 \right] / \left\{ 960 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{2}{5} + \phi_1 \right] \right\}$$

$$N_{13} = \Psi_1 \left[-2 + \frac{124}{3} \phi_1 + \frac{1384}{3} \phi_1^2 + \frac{3770}{3} \phi_1^3 + \frac{3200}{3} \phi_1^4 + 200 \phi_1^5 \right] / \left\{ 960 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{2}{5} + \phi_1 \right] \right\}$$

$$M_{14} = \left\{ - \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \left[6 + 12 \phi_1 + 59 \phi_2 - 130 \phi_1^2 - 615 \phi_1 \phi_2 - 90 \phi_2^2 - 360 \phi_1^3 - 2000 \phi_1^2 \phi_2 - 510 \phi_1 \phi_2^2 - 200 \phi_1^4 - 1300 \phi_1^3 \phi_2 - 600 \phi_1^2 \phi_2^2 - 400 \phi_1 \phi_2^3 - 200 \phi_1^3 \phi_2^2 \right] + \Psi_1 \Psi_2 \left[12 - 80 \phi_1 - 170 \phi_2 - 240 \phi_1^2 - 150 \phi_1 \phi_2 - 340 \phi_2^2 - 100 \phi_1^2 \phi_2 - 300 \phi_1 \phi_2^2 - 200 \phi_1^3 \phi_2^2 \right] \right\} / \left\{ 1152 \phi_1 \phi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \right\}$$

$$N_{14} = \left\{ - \Psi_1 \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \left[12 - 80 \phi_1 + 170 \phi_2 - 240 \phi_1^2 + 150 \phi_1 \phi_2 + 340 \phi_2^2 + 100 \phi_1^2 \phi_2 + 300 \phi_1 \phi_2^2 + 200 \phi_1^3 \phi_2^2 \right] - \Psi_2 \left[6 + 12 \phi_1 + 45 \phi_2 - 130 \phi_1^2 + 255 \phi_1 \phi_2 + 90 \phi_2^2 - 360 \phi_1^3 + 300 \phi_1^2 \phi_2 + 510 \phi_1 \phi_2^2 - 200 \phi_1^4 + 100 \phi_1^3 \phi_2 + 600 \phi_1^2 \phi_2^2 + 200 \phi_1 \phi_2^3 \right] \right\} / \left\{ 1152 \phi_1 \phi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \right\}$$

$$M_{21} = \left[12 - 8 \phi_1 - 946 \phi_1^2 - 2720 \phi_1^3 - 1720 \phi_1^4 \right] / \left\{ 288 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \right\}$$

$$N_{21} = \Psi_1 \left[24 - 16 \phi_1 + 860 \phi_1^2 + 2120 \phi_1^3 + 800 \phi_1^4 \right] / \left\{ 288 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \right\}$$

$$M_{22} = \left[1 + 23 \phi_1 + \frac{6077}{9} \phi_1^2 + \frac{7126}{3} \phi_1^3 + 2924 \phi_1^4 + 1560 \phi_1^5 + \frac{3040}{9} \phi_1^6 \right] / \left\{ 480 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{2}{5} + \frac{1}{3} \phi_1 + \frac{2}{15} \phi_1^2 \right] \right\}$$

$$N_{22} = \Psi_1 \left[2 + 46 \phi_1 - \frac{4970}{9} \phi_1^2 - \frac{16684}{9} \phi_1^3 - \frac{15920}{9} \phi_1^4 - \frac{7840}{9} \phi_1^5 - \frac{1600}{9} \phi_1^6 \right] / \left\{ 480 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{2}{5} + \frac{1}{3} \phi_1 + \frac{2}{15} \phi_1^2 \right] \right\}$$

$$M_{23} = \left\{ \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \left[2 - 25 \phi_1 - 10 \phi_1^2 \right] \left[6 + 72 \phi_2 + 40 \phi_2^2 \right] - \Psi_1 \Psi_2 \left[2 + 5 \phi_1 + 10 \phi_1^2 \right] \left[6 - 20 \phi_2 - 40 \phi_2^2 \right] \right\} / \left\{ 576 \phi_1 \phi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \right\}$$

$$N_{23} = \left\{ \Psi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[2 - 25 \phi_1 - 10 \phi_1^2 \right] \left[6 - 20 \phi_2 - 40 \phi_2^2 \right] + \Psi_1 \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \left[2 + 5 \phi_1 + 10 \phi_1^2 \right] \left[6 + 72 \phi_2 + 40 \phi_2^2 \right] \right\} / \left\{ 576 \phi_1 \phi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \right\}$$

$$M_{31} = - \left[4 - \frac{152}{3} \phi_1 + \frac{881}{3} \phi_1^2 + 1140 \phi_1^3 + 700 \phi_1^4 \right] / \left\{ 576 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \right\}$$

$$N_{31} = \Psi_1 \left[-8 + \frac{304}{3} \phi_1 + 350 \phi_1^2 + 800 \phi_1^3 + 200 \phi_1^4 \right] / \left\{ 576 \phi_1^2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \right\}$$

$$M_{32} = \left\{ \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \left[4 \phi_1 - 2 \phi_2 + 13 \phi_1^2 - 40 \phi_1 \phi_2 - 20 \phi_2^2 + 140 \phi_1^3 + 665 \phi_1^2 \phi_2 + 80 \phi_1 \phi_2^2 + 260 \phi_1^4 + 2040 \phi_1^3 \phi_2 + 510 \phi_1^2 \phi_2^2 + 1100 \phi_1 \phi_2^3 + 800 \phi_1^2 \phi_2^2 + 200 \phi_1^3 \phi_2^2 \right] - \Psi_1 \Psi_2 \left[8 \phi_1 + 20 \phi_2 - 130 \phi_1^2 - 80 \phi_1 \phi_2 + 40 \phi_2^2 - 360 \phi_1^3 + 50 \phi_1^2 \phi_2 - 160 \phi_1 \phi_2^2 - 200 \phi_1^4 + 100 \phi_1^3 \phi_2 + 100 \phi_1^2 \phi_2^2 + 200 \phi_1 \phi_2^3 \right] \right\} / \left\{ 1152 \phi_1^2 \phi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \right\}$$

$$N_{32} = \left\{ \Psi_1 \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \left[8 \phi_1 - 4 \phi_2 - 130 \phi_1^2 - 80 \phi_1 \phi_2 - 40 \phi_2^2 - 360 \phi_1^3 - 550 \phi_1^2 \phi_2 + 160 \phi_1 \phi_2^2 - 200 \phi_1^4 - 1300 \phi_1^3 \phi_2 - 100 \phi_1^2 \phi_2^2 - 400 \phi_1 \phi_2^3 - 200 \phi_1^2 \phi_2^2 \right] + \Psi_2 \left[4 \phi_1 + 10 \phi_2 + 13 \phi_1^2 - 40 \phi_1 \phi_2 + 20 \phi_2^2 + 140 \phi_1^3 - 255 \phi_1^2 \phi_2 - 80 \phi_1 \phi_2^2 + 260 \phi_1^4 - 400 \phi_1^3 \phi_2 - 510 \phi_1^2 \phi_2^2 - 100 \phi_1 \phi_2^3 - 800 \phi_1^2 \phi_2^2 - 200 \phi_1^3 \phi_2^2 \right] \right\} / \left\{ 1152 \phi_1^2 \phi_2 \left[\frac{1}{2} + \phi_1 \right] \left[\frac{1}{2} + \phi_2 \right] \right\}$$

流速は式(7)から次式で与えられる。

$$v' = - \frac{1}{\sqrt{I_n}} \left[1 + \frac{A'_0}{2} y_1 + \frac{A'_0}{4} y_2 + \frac{A'_0}{8} y_3 \right]^{2/3} \cdot \left[1 + \frac{A'_0}{2} \frac{\partial y_1}{\partial x'} + \frac{A'_0}{4} \frac{\partial y_2}{\partial x'} + \frac{A'_0}{8} \frac{\partial y_3}{\partial x'} \right]^{1/2} \dots (16)$$

(3) 解の精度

式(9)は式(5)における慣性項を省略した式であり、式(11)はさらにその近似解である。それゆえ、式(11)の精度に関しては以下のような二通りの誤差が関与している。ここでは、厳密解にかわるものとして有限差分法による数値解を求め、その数値解をもとにこれら

の誤差がパラメーターの値といかなる関係にあるかを明確にする。なお、数値解は四点陰型式差分法¹⁸⁾を用いた解である。

(i) 式(5), (6)の数値解と式(9)の数値解を比較することにより、慣性項省略の影響度を調べる。

(ii) 式(9)の数値解と式(11)を比較し、この解析解(近似解)の精度を調べる。

おのおのの解の比較は、河道に沿う最高水位を用いた次の誤差率 η によって行う。

$$\eta = \frac{[\Delta H'_{1,max}(x') - \Delta H'_{2,max}(x')]^2}{\Delta H'_{1,max}(x')} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、(i)の比較をする場合は、 $\Delta H'_{1,max}$:式(5), (6)の数値解から求まる各地点の最高水位, $\Delta H'_{2,max}$:式(9)の数値解から求まる最高水位。(ii)の比較をする場合は、 $\Delta H'_{1,max}$:式(9)の数値解から求まる最高水位, $\Delta H'_{2,max}$:式(12)で与えられる $\Delta H'$ の各地点での最大値。記号 $\overline{\quad}$ は、河口 ($x'=0$) から $x'=1.4$ の地点までの場所的平均値を表わす。

Fig. 2は、上記(i)に関する誤差率 η が5%, あるいは10%以下となるパラメーターの範囲を示す。図中の三角印は慣性項を省略することによって最高水位が低下するケース ($\Delta H'_{1,max} > \Delta H'_{2,max}$), 丸印は上昇するケース ($\Delta H'_{1,max} < \Delta H'_{2,max}$) を表わす。 I_n が大きい場合 ($I_n = 30, 100$) は、 A_0 が大きく T' が小さいほど、つまり水位上昇速度が大きいほど慣性項省略の影響は大きい。これに対して I_n が小さい場合 ($I_n = 5, 10$) は、水位上昇速度が小さい (A_0 が小さく、 T' が大きい) 領域でも省略の影響が大きくなる。これは I_n の減少とともに流速が増し、式(5)における移流加速度項(第2項)の値が相対的に大きくなるためと考えられる。

Fig. 3は、上記(ii)に関する誤差率 η を示したものである。この図から、式(9)の数値解に対する式(11)の誤差率は I_n, T' に関係せず、 A_0 のみに依存することがわかる。また、 A_0 が0.4~0.5より小さければ、式(11)は式(9)に対する誤差率が5%以下の高精度の解である。これに対して第二次近似解の場合は、 A_0 が0.3のとき誤差率 η は5~6%, A_0 が0.4のとき η は8~10%である¹⁹⁾。

3. 河川水位の変動特性

(1) 解の構造

水位変動 h' は式(11)に示したとおり、 y_1, y_2 および y_3 に含まれる異なった波高、周波数、位相をもつ波の重ね合わせとして得られた。この解の構造をもとに、水位変動特性、すなわち水位波形の変形、減衰、伝播の機構について以下に考察する。

Fig. 4は、式(12)の $\Delta H'/A_0$ (実線) およびそれを

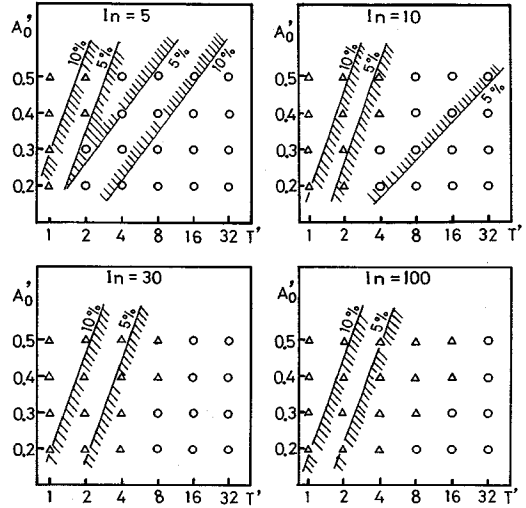


Fig. 2 Error of solution due to omission of inertia terms.

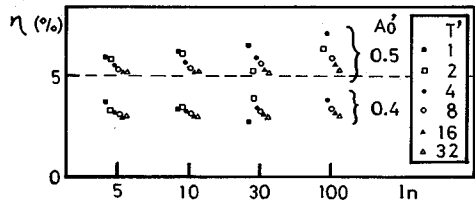


Fig. 3 Relative error of Eq. (12) to numerical solution of Eq. (9).

構成する右辺の各項(点線)の大きさを示す。第一次近似項 y_1 は正弦波形である。しかし、倍周波数あるいは3倍周波数の波を含んだ高次の近似項 (y_2, y_3 の項) ほど波速が大きいため、その合成波である $\Delta H'/A_0$ は河川遡上とともに前面が立ち上がり、ピーク後が緩やかになる。このように水位波形の変形は高周波数成分によってもたらされるので、従来扱われている第二次近似項 (y_2 の項) に加えてここで得た第三次近似項 (y_3 の項) がその特性を再現するのに役立つ。

次に、値が最も大きい y_1 の項について、振幅の減衰率 α および波速 c は式(13)から次のように与えられる。

$$\alpha = \frac{5}{3} + p_1 \dots\dots\dots (18)$$

$$c = \frac{\gamma}{q_1} \dots\dots\dots (19)$$

上式の p_1 および q_1 はいずれも T', I_n の関数であり、したがって α, c は T', I_n の値によって Fig. 5, Fig. 6 のような値をとる。 y_1 の振幅の減衰率および波速に及ぼすこのような T', I_n の影響は、後述の河道に沿う最高水位の減衰率およびその伝播速度に及ぼす T', I_n の影響と同一の傾向である。また、Fig. 7は河口 ($x'=0$) の水位変動に対する $x'=1$ の地点の水位変動の位相の遅

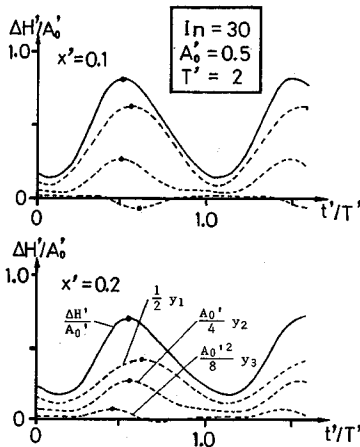


Fig. 4 Variations of water level with time.

れ角 $\delta = q_1$ (rad) を示す。

Fig. 5~Fig. 7 における諸量の対応関係より、位相の遅れが大きいほど減衰率は大きい。また、波速と位相の関係は、 T' が一定のときは波速が大きいほど位相の遅れは小さいが、 I_n が一定のときは波速が小さいほど位相の遅れは少ない。したがって、 T' が十分大きくなれば波速はゼロに近づくが、上・下流の水位が同一位相で変動するようになる。

(2) 河道に沿う最高水位

河道に沿う最高水位に関しては、式 (12) を計算して $\Delta H'$ の最大値 $\Delta H'_{max}$ をとれば求められるが、以下のような簡略な式で算定することができる。

Fig. 4 に示したように、式 (12) における各近似項のピークは生起時刻に若干の時差があるが、この時差を無視してすべてのピークが同時に生起するものと仮定すれば、最高水位は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta H'_{max}}{A'_0} = \frac{\Delta H_{max}}{A_0} = \frac{1}{2} y_{1,max} + \frac{A'_0}{4} y_{2,max} + \frac{A_0'^2}{8} y_{3,max} \dots\dots\dots (20)$$

$$y_{1,max} = \exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] + \exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] \dots\dots (21)$$

$$y_{2,max} = \frac{13}{6} \left\{ \exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] - \exp\left[-\frac{20}{3} x'\right] \right\} + D_0 \left[\exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] - \exp\left[-2\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] \right] + D_1 \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] - \exp\left[-(5 + p_1) x'\right] \right] + D_2 \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_2\right] x'\right] - \exp\left[-2\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] \right] \dots\dots\dots (22)$$

$$y_{3,max} = D_{01} \left[\exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] - \exp\left[-\frac{20}{3} x'\right] \right] + D_{02} \left[\exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] - \exp(-10 x') \right]$$

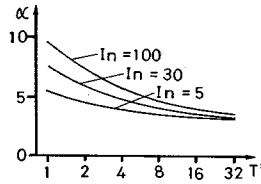


Fig. 5 Attenuation coefficient of amplitude of y_1 .

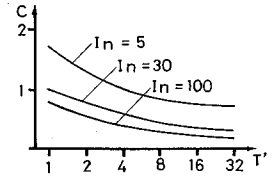


Fig. 6 Wave velocity of y_1 .

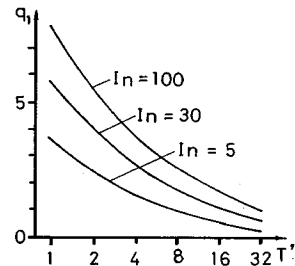


Fig. 7 Phase coefficient of y_1 .

$$+ D_{03} \left[\exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] - \exp\left\{-2\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] + D_{04} \left[\exp\left[-\frac{10}{3} x'\right] - \exp\left\{-2\left[\frac{10}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] + D_{11} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] - \exp\left\{-(5 + p_1) x'\right\} \right] - D_{12} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] - \exp\left\{-\left[\frac{25}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] - D_{13} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] - \exp\left\{-3\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] + D_{14} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right] - \exp\left\{-\left[\frac{10}{3} + p_1 + p_2\right] x'\right\} \right] + D_{21} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_2\right] x'\right] - \exp\left\{-2\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] - D_{22} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_2\right] x'\right] - \exp\left\{-2\left[\frac{10}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] + D_{23} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_2\right] x'\right] - \exp\left\{-(5 + p_2) x'\right\} \right] - D_{31} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_3\right] x'\right] - \exp\left\{-3\left[\frac{5}{3} + p_1\right] x'\right\} \right] + D_{32} \left[\exp\left[-\left[\frac{5}{3} + p_3\right] x'\right] - \exp\left\{-\left[\frac{10}{3} + p_1 + p_2\right] x'\right\} \right] \dots\dots\dots (23)$$

Fig. 8 は上式による計算結果の一例を示したもので、同図にはほぼ厳密な値と考えられる式 (5), (6) の数値計算結果も併示してある。

図から推察できるように、第二次近似解では河口の直上流の水位が河口水位より高くふくれ上がり、その上流部では厳密値より低くなるという結果を与える。第三次近似項は一般に、そのような部分を補正するのに貢献する。また、式 (12) から求めた最高水位と式 (20) の差は、 T' が小さく I_n が大きいほど大きい。しかし、その

誤差率は最大でも4%程度であり、式(20)は最高水位に対する高精度の近似式であるといえよう。

式(20)より、最高水位 $\Delta H'_{max}/A'_0$ は A'_0 , T' , I_n に関係する。まず、この最高水位に及ぼす A'_0 の影響については、Fig.9の左図のように A'_0 が大きいほど $\Delta H'_{max}/A'_0$ は大きい。これは式(20)において右辺第3項の $y_{3,max}$ は河口付近で負の値をとるがその値は小さいので、 A'_0 が大きいほど第2項と第3項の和が増大するためである。 A'_0 が大きい場合は河口付近で $y_{2,max}$, $y_{3,max}$ の項の影響が大きく、水位は高くなるが、上流部ではこれらの項も $y_{1,max}$ と同じ減衰率で減衰する。 A'_0 が小さければ $y_{1,max}$ の項が支配的となるため、河口付近からほぼ一定の減衰率で減衰する。

T' , I_n の影響については、それぞれ Fig.9の中央図、右図のように T' が大きく I_n が小さいほど最高水位は高くなる。このことを $y_{1,max}$ の減衰率の性質から説明することができる。 $y_{1,max}$ の減衰率は河道に沿って変化するが、河口付近では y_1 の振幅の減衰率 α (Fig.5) と同様に T' が大きく I_n が小さいほど小さい値となるので、河口付近の最高水位は高くなる。これに対して上流部では、 T' が大きいとき、あるいは I_n が小さいときに $y_{1,max}$ の減衰率が大きくなる場合もあるが、このときすでに水位は減衰しており最高水位の大小にはあまり影響しない。

結局、 T' および I_n の影響は α の値により評価できるから、式(18)より p_1 の値に依存する。特に、 $T' \rightarrow \infty$ とすれば p_1 の値は最小となり ($p_{1,min}=5/3$)、最高水位

は最も高くなる。このとき式(20)から、定常不等流の水面形を与える近似式が次のように得られる。

$$\frac{\Delta H'_{st}}{A'_0} = \frac{\Delta H_{st}}{A_0} = \exp\left[-\frac{10}{3}x'\right] + \frac{13}{6}A'_0 \left\{ \exp\left[-\frac{10}{3}x'\right] - \exp\left[-\frac{20}{3}x'\right] \right\} + \frac{13}{108}A_0'^2 \left\{ 23\exp\left[-\frac{10}{3}x'\right] - 78\exp\left[-\frac{20}{3}x'\right] + 55\exp(-10x') \right\} \dots (24)$$

ここに、 $\Delta H'_{st} = \Delta H_{st}/h_0$, $\Delta H_{st} = h_{st} - h_0$, すなわち ΔH_{st} は等流水面を基準とした定常不等流水面の高さである。

(3) 最高水位の伝播速度

最高水位の伝播速度は式(12)に含まれる各素波の波速 γ/q_1 , $2\gamma/q_2$, $3\gamma/q_3$ 等に関係し、さらに諸パラメーターも影響するので、それらの関係を調べる。

Fig.10は、河道の各地点における最高水位の生起時刻をそれぞれ A'_0 , T' , I_n をパラメーターとして示したものである。ここに、河口におけるピーク水位の生起時刻を $t'=0$ とした。点線は、波速が γ/q_1 である波のピーク水位を示す。 A'_0 の影響については A'_0 が大きいほど伝播速度は大きく、 T' , I_n の影響については T' , I_n が小さいほど伝播速度は大きい。いずれのケースも河口付近で速度は大きいが、河川を遡上するにつれて一定の速度 γ/q_1 に近づく。これは次のように説明できる。

一般に、 $\gamma/q_1 < 2\gamma/q_2 < 3\gamma/q_3$ であり、高周波数の波ほど波速は大きい。式(11)あるいは(12)から明らかに、 A'_0 が大きいほど高次の近似項の影響が強くなり、これらの項には高周波数の波が含まれているため伝播速度は大きい。しかし、河川遡上とともに高次の項は減衰して第1項の波速 γ/q_1 が支配的になる。 $A'_0=0.2$ のときは河口近くからほぼ一定の速度で伝播しているが、これは河口付近でも高次の項が相対的に小さいためである。

また、式(12)による最高水位の生起時刻を式(5),(6)の数値計算結果と比較すると、図に示すように前者の方が若干速く進み、特に $T'=1$ あるいは $I_n=10$ のときその差は大きい。これは慣性項を省略したことの影

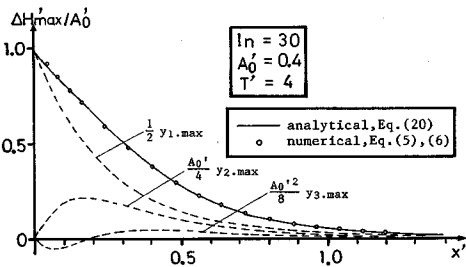


Fig.8 Magnitude of the respective terms in Eq. (20).

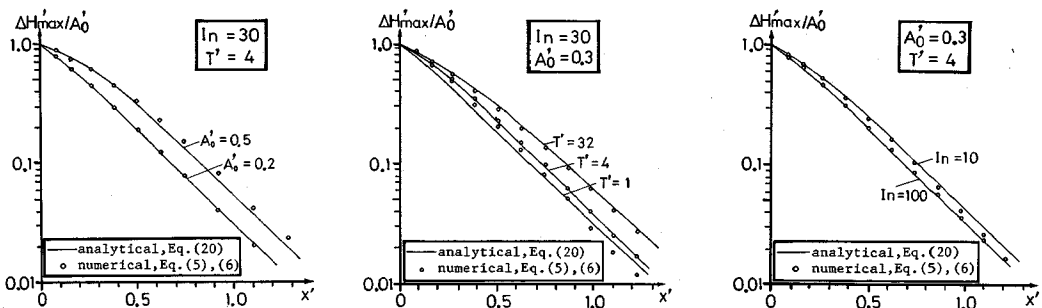


Fig.9 Maximum water level along river channel.

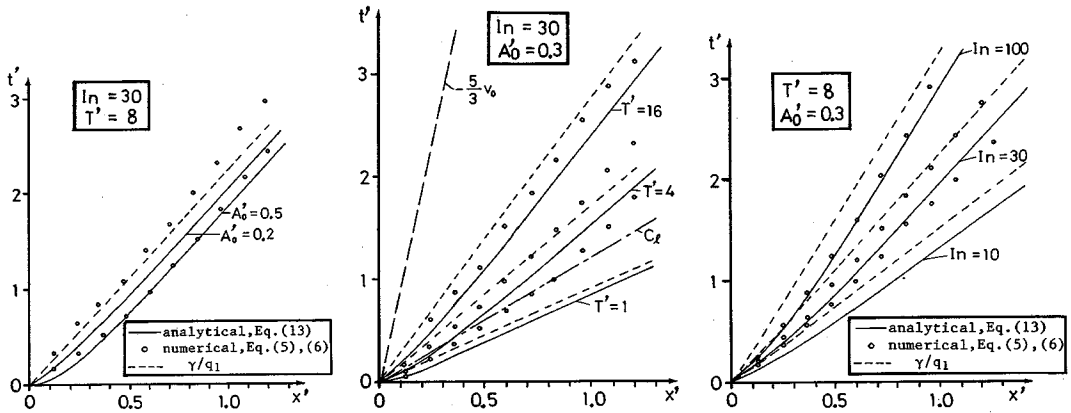


Fig. 10 Propagation of maximum water level.

響である。

いま、非常に長い周期の水位変動を考えれば、 γ/q_1 は次式で近似できる。

$$\frac{\gamma}{q_1} = \frac{5}{3\sqrt{I_n}} = -\frac{5}{3} v_0 \dots\dots\dots (25)$$

これは、洪水流において Kleitz-Seddon の法則として与えられる伝播速度 $(-5/3)v_0$ に近い値であり、その速度で上流に向かって最高水位が伝播することを意味する (Fig. 10 の中央の図の破線)。

一方、河川を遡上する長波の伝播速度は、粗い近似であるが等流水深に対して

$$c_i = 1 - 1/\sqrt{I_n} \dots\dots\dots (26)$$

で与えられ、これを同図に一点鎖線で示してある。水位変動の周期が短くなり $T'=1$ 程度になると、この c_i に近づいていることがわかる。したがって、さらに周期が短くなれば、それは慣性項が支配的になる通常の長波の領域に入り、上述の解析解は適用できないことを示唆する。

結局、本研究で対象とするような水位変動では、周期の長短に応じて長波の伝播速度と Kleitz-Seddon 法則との中間の速度で最高水位は伝播する。つまり、感潮部における最高水位の伝播の挙動には、通常の波動論で説明される長波の性質や kinematic wave 理論による洪水波の性質とは異なった特性が存在するといえよう。

4. 感潮河川の計画高水位

(1) 不定流の最高水位と定常不等流水位の関係

感潮部における計画高水位決定の際、河口水位を水位変動のピーク水位に保ち、計画高水流量に対する定常不等流水面を計算すれば、その水面高が最も安全側の水位と考えられる。これを確かめるために、この定常不等流水位と上述の不定流計算による最高水位との水位差を求めた。

定常不等流水位は式 (24) で近似的に与えられるが、これは慣性項 (定常流だから移流加速度項のみ) を省略して得られたものである。近似度を高めるために慣性項を省略せずに別の方法で解けば、次式で与えられる²⁰⁾。

$$\frac{\Delta H'_{st}}{A_0'} = \frac{\Delta H_{st}}{A_0} = \zeta_1 + A_0' \zeta_2 + A_0'^2 \zeta_3 \dots\dots\dots (27)$$

ここに、

$$\zeta_1 = \exp \left\{ -\frac{10I_n}{3(I_n-1)} x' \right\} \dots\dots\dots (28)$$

$$\zeta_2 = \frac{13I_n+5}{6(I_n-1)} \left[\exp \left\{ -\frac{10I_n}{3(I_n-1)} x' \right\} - \exp \left\{ -\frac{20I_n}{3(I_n-1)} x' \right\} \right] \dots\dots\dots (29)$$

$$\zeta_3 = \frac{1}{108(I_n-1)^2} \left[(299I_n^2+131I_n+56) \exp \left\{ -\frac{10I_n}{3(I_n-1)} x' \right\} - (1014I_n^2+780I_n+150) \exp \left\{ -\frac{20I_n}{3(I_n-1)} x' \right\} + (715I_n^2+649I_n+94) \exp \left\{ -\frac{10I_n}{I_n-1} x' \right\} \right] \dots\dots (30)$$

上式において不等流水位に影響するパラメーターは、 A_0' および I_n である。 A_0' の影響については、前述の河道に沿う最高水位と同様に、 A_0' が大きいほど高次の近似項の影響が増すので不等流水位は高くなる。 I_n の影響については ζ_1 の減衰率から説明でき、 I_n が大きいほど水位の減衰は少なく、河道に沿う最高水位 (Fig. 9) とは逆の傾向を示す。この結果、 I_n が大きいほど不等流水位と最高水位との水位差は増大することになる。この水位差がどの程度の大きさであるかを以下に示す。

河道に沿う両者の水位差は次式で与えられる。

$$\frac{\xi'}{A_0'} = \frac{\xi}{A_0} = \frac{\Delta H_{st} - \Delta H_{max}}{A_0} \dots\dots\dots (31)$$

ここに、 $\xi = \Delta H_{st} - \Delta H_{max}$ 、 $\xi' = \xi/h_0$ 。

式 (31) の ΔH_{st} 、 ΔH_{max} を式 (27)、式 (20) あるいは数値計算により求め、 ξ'/A_0' の最大値 ξ'_{max}/A_0' を示し

たものが Fig. 11 である。図のように、 I_n が大きく T' が短い場合は河口で与えた波高 A_0 の 10% 前後の水位差が生じ得る。また、水位差の最大値 ξ'_{max} が生ずる地点を Fig. 12 に示す。 A_0' が大きいほど上流の地点に生ずる傾向があり、 I_n が小さい場合にその傾向が強いが、その場合は水位差が小さいので最大値の地点は明瞭ではない。したがって、最大水位差は $x' = x/l = 0.3 \sim 0.6$ の地点で生ずると考えてよい。

次に、Table 1 は、次式で定義した河道に沿う平均的な水位差を示す。

$$\sigma = \sqrt{\xi'^2 / \Delta H_{st}} \dots \dots \dots (32)$$

ここに、 ξ' は式 (31) における ΔH_{st} 、 ΔH_{max} として数値計算により求めた値を用いており、 σ は河口から $x' = 1.4$ の地点までの平均値を表わす。

σ の値は上述の ξ'_{max} と同様に、 A_0' および T' が小さく、 I_n が大きいほど大きい。式 (32) のように定義しているので ξ' の符号がこの表からはわからないが、 ξ' (あるいは ξ) の河道に沿う平均値はすべての条件に対して正の値をとる。すなわち、不等流水位は不定流の最高水位より常に高い水位である。また、その水位差は、この表より平均堰上げ水深 ΔH_{st} の 30% 近くになる場合がある。この結果から、計画高水位の決定にあたっては不等流水位を採用すれば安全側であるが、水理条件によっては安全過ぎる場合もあるので、一般に不定流の最高水位をも併せて検討することが必要である。

(2) 不定流の最高水位・不等流水位の水位差と水位変動の位相遅れとの関係

河道に沿う各地点での水位変動の、河口での水位変動に対する位相の遅れがゼロであれば、いうまでもなく水位は全河道を通じて一体となって上昇・下降する。不定流ではもちろん、各地点の水位変動の間に位相遅れがあり、これが上述のような不等流との水位差に関係すると考えられる。そこで、代表的に $x' = 1$ の地点の水位変動に注目し、河口の水位変動に対する y_1 の位相の遅れ角 $\delta = q_1$ (rad) を示したものが Fig. 13 である。 q_1 と T' 、 I_n の関係は、Fig. 11 の ξ'_{max} と T' 、 I_n の関係とよく対応している。この対応関係から、位相の遅れが大きくなることにより水位差が大きくなり、一方、位相の遅れが小さくなり上・下流の水位が一体化して変動する場合ほど水位差が少なくなるといえよう。

また、 A_0' の影響については、 A_0' が小さい場合ほど最高水位の伝播速度は小さく、位相の遅れは大きい。これより、不等流との水位差が大きくなると考えられる。

5. 結 論

本研究で得られた結果を要約すれば次のとおりであ

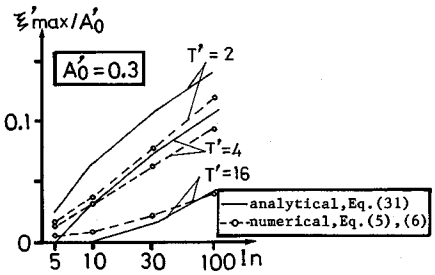


Fig. 11 Maximum difference between ΔH_{st} and ΔH_{max} .

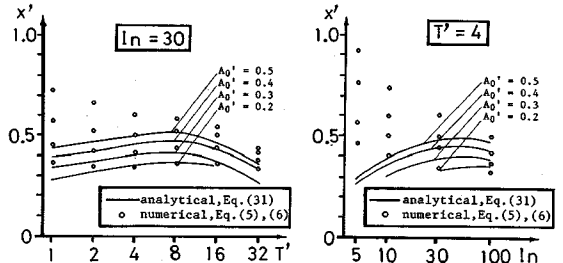


Fig. 12 Location where maximum difference of water levels occur.

Table 1 Magnitude of σ .

		(単位 %)							
		5				10			
T'	A_0'	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
1		6.4	4.2	2.9	3.1	12.7	9.7	6.8	4.5
2		5.5	3.5	2.3	3.0	11.1	8.9	6.5	4.3
4		4.2	3.1	2.0	1.8	8.3	7.4	6.2	4.7
8		3.1	1.7	1.2	0.7	5.5	4.3	3.9	3.3
16		1.0	0.8	0.4	0.2	2.3	1.9	1.6	1.3
32		0.5	0.2	0.4	0.1	1.0	0.6	0.8	0.5
		30				100			
T'	A_0'	0.2	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5
1		23.9	19.4	14.4	9.7	36.0	29.0	21.9	17.8
2		20.1	17.7	14.6	10.9	30.0	26.7	21.9	16.5
4		16.0	14.5	13.3	11.6	24.0	21.9	20.3	17.9
8		12.3	9.6	9.3	8.7	18.7	15.9	15.6	14.8
16		6.3	5.2	4.6	4.4	12.1	10.8	9.7	9.5
32		2.6	2.4	2.0	1.7	6.3	5.6	5.2	4.4

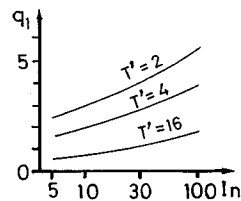


Fig. 13 Relation of phase coefficient to I_n and T' .

る。

(1) 長周期の河口水位変動に伴う河川感潮部の水位変動の解析解として、摂動法による第三次近似解を導出した。この解は、従来扱われている二次の近似解に比べて十分高い精度を有する。また、得られた解が一定の精

度で適用できるパラメーター値の範囲を示した。

(2) 河道各地点の最高水位に関する近似式を得て、パラメーターとの関係を明らかにした。本文では無次元化した諸量について調べたが、有次元の量に戻してその影響を述べれば次のとおりである。河道に沿う最高水位は、水位変動の波高が大きく、周期が長く、河床勾配が緩く、流量が多いほど高くなる。特に、河口水位変動の周期が無大の場合に相当する定常不等流において、水位は最も高くなる。これらの関係は、解析解における第一次近似項の減衰率の性質、あるいは高次の近似項の影響度によって説明できる。

(3) 最高水位の伝播速度は、水位変動の波高が大きく、周期が短く、河床勾配が緩く、流量が多いほど大きい。また、河道に沿っては、河口付近で速く、河川を遡上するにつれて一定の速度 γ/q_1 に近づく。

(4) 不定流の最高水位と定常不等流水位の水位差は、河口水位変動の波高が小さく、周期が短く、河床勾配が緩いほど大きい。これは、河口の水位変動に対する河道各地点の水位変動の位相の遅れが増大するほど、感潮域全体の流れが一体化して変動する度合いが弱くなるためである。その水位差は平均堰上げ水深の 20~30% にも達する場合がある。したがって、感潮河川における計画高水位として定常不等流水位を用いることは安全側ではあるものの、周期が比較的短い河口水位変動を対象とする場合は不定流計算による最高水位との比較によりその安全度が過大でないかどうかを評価する必要がある。

本研究では、等流状態の流れに水位変動を重ね、かつ流れが逆流しない場合を対象にして以上の結果を得た。さらに一般的な条件に対して検討すべき課題は残されているが、ここに明らかにした基本的な水位変動特性は、感潮部の計画高水位の決定、あるいは治水施設の計画・管理に際して役立つものと考えられる。

おわりに、本研究において有益なご助言を賜った神戸大学 篁 源亮教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 端野道夫・神田 徹・北澤聖司・横山真至：台風性降雨と高潮の同時生起性に関する研究，土木学会論文集，第 357 号/II-3，1985。
- 2) Ichiye, T. : On the abnormal high waters in rivers, Oceanographical Magazine, Vol. 5, No. 1, 1953.

- 3) 矢野勝正：高潮の河川遡上に関する理論，京大防災研究所年報，第 4 号，1961。
- 4) Hayami, S., Yano, K., Adachi, S. and Kunishi, H. : Experimental studies on meteorological tsunamis travelling up the rivers and canals in Osaka City, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bull. No. 9, 1955.
- 5) 岩垣雄一・中村重久：大阪市内河川の高潮遡上に関する実験，第 14 回海岸工学講演会講演集，1967。
- 6) 岡本元治郎：河川に於ける潮汐，地球物理，4-1，1940。
- 7) 吉川秀夫：感潮河川の計算，土木学会論文集（臨時増刊），1949。
- 8) 宇野木早苗：河川潮汐の研究（第 1 報），第 15 回海岸工学講演会講演集，1968。
- 9) 宇野木早苗：河川潮汐の研究（第 2 報），第 16 回海岸工学講演会講演集，1969。
- 10) 矢野勝正・足立昭平・奥田節夫・樋口昭夫・大同淳之：寝屋川模型実験—鴻池堰操作の基本方式，京大防災研究所創立 5 周年記念論文集，1956。
- 11) 小西達男・木下武雄：高潮の河川遡上に関する研究（II），国立防災科学技術センター報告，第 34 号，1985。
- 12) たとえば，Peregrine, D.H., ed. : Floods due to High Winds and Tides, Academic Press, 1981。
- 13) 木下武雄：超音波により連続的に観測された洪水・潮汐等の流量変化の不定流としての挙動，国立防災科学技術センター報告，第 27 号，1982。
- 14) 神田 徹・横山真至・林 達郎：河川を遡上する高潮特性の実験的研究，土木学会関西支部年次学術講演会，1984。
- 15) 今本博健・澤井健二・上田伸三：下流水位の時間変化が水面形に及ぼす影響について，土木学会関西支部年次学術講演会，1985。
- 16) Kanda, T. and Hamamura, Y. : Storm surges running up the river of uniform flow, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol. 4, No. 1, 1986。
- 17) 神田 徹・浜村吉昭・村岡めぐみ：流れを遡る長周期波—近似解の導出—，建設工学研究所報告，第 28 号，1986。
- 18) 昭和 60 年版水理公式集，土木学会，pp. 211~214，1985。
- 19) 神田 徹・浜村吉昭・村岡めぐみ：河川を遡上する長周期波の解析解の適用範囲，土木学会第 41 回年次学術講演会，1986。
- 20) 神田 徹・浜村吉昭：広幅長方形断面水路における堰上げ背水曲線の簡略計算式，土木学会論文集，第 387 号/II-8，1987。

(1987. 5. 14・受付)