II-138　特性曲線法によるドライ・ベッド水路上の段波伝播解析

電力中央研究所　正員　河西　基
電力中央研究所　正員　白砂孝夫
電力中央研究所　正員　五十嵐由雄

1\. はじめに　近年，河川域周辺における都市化の進行は著しく，ダムからの急激な洪水放流などに伴う下流河川の警戒体制の整備が緊要な課題となっており，このため複雑な水路条件が多く含まれるダム下流河川を段波現象を呈して流下する洪水伝播の予測解析手法の確立が不可欠である。本報告は，とくにドライ・ベッドを含む河道における段波を対象として特性曲線法に基づく合理的な解析モデルを作成するとともに，室内実験結果および実際河川での観測値と本解析モデルを適用した結果との比較・検討を行ったものである。

2\. 解析モデルの内容

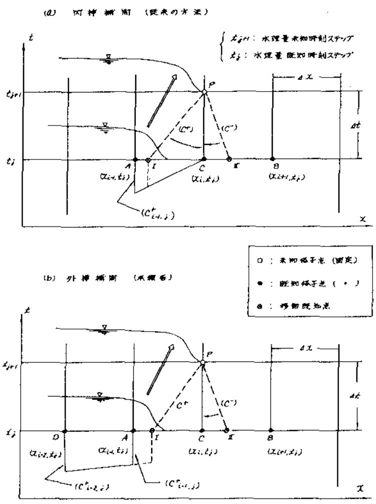
(1) 基礎方程式：　本解析においては，台形断面水路を対象として幅の変化率を陽に考慮した次の1次元漸変流に関する基礎方程式を用いる[1]。

連続の式：$$\frac{\partial h}{\partial t}+v\frac{\partial h}{\partial x}+\xi h\frac{\partial v}{\partial x}=-\frac{\eta}{T}hv \quad \text{----------}(1)$$

運動方程式：$$\xi\frac{\partial v}{\partial t}+\xi v\frac{\partial v}{\partial x}+g\cos\theta\,\xi\frac{\partial h}{\partial x}=\frac{g}{T}\left\{\sin\theta\cdot B_0-\frac{\eta}{2}\cos\theta\, h+\sin\eta_0\cdot h\right\}-\frac{\{B_0+\cos\eta_0(\sqrt{1+\delta_1^2}+\sqrt{1+\delta_2^2})h\}}{T}\left(\frac{\tau_0}{\rho h}\right) \quad \text{--}(2)$$

ここに，$\xi=\{B_0+(\delta_1+\delta_2)h/2\}/\{B_0+(\delta_1+\delta_2)h\}$, $T=B_0+(\delta_1+\delta_2)h$, $\eta_0\equiv\tan^{-1}(\eta/2)$ ----(3)，h：水深，v：断面平均流速，x：距離，t：時間，g：重力加速度，τ_0：摩擦応力，ρ：水の密度，B_0：水路床幅，δ_1, δ_2：水路側壁の傾き，η：水路床幅の変化率，θ：水路床勾配であり，τ_0としては次のマニングの抵抗則を用いる。　$\tau_0=\rho g n^2 v^2/R^{1/3}$ --- (4)（n：粗度係数，R：径深）

(2) 特性曲線網の外挿補間モデル：　特性曲線法においては，特性曲線網の乱れに起因する数値解析上の困難さを回避するために，次の式



図－1　特性曲線網の整斉法

$C=v\pm\sqrt{gh}$ -----(5)　で与えられる波速の内挿補間による特性曲線網の整斉が通常行われている[2]。しかしながら，本報告で対象とするドライ・ベッドを含むような河道における段波現象の場合には，流れ先端部の流況は急峻かつ複雑と成って数学的特異点を伴うとされている[3]。この場合，図－1aに示したように，規則的な固定格子点位置に未知点Pを求めるために上述の内挿補間に基づく既知格子点の移動を施すのであるが，次のC.F.L.の安定条件　$\Delta t\leq\Delta X/(v+\sqrt{gh})$ ----(6)　を自動的に満足させることを前提とすれば，段波が既に到達して波速を有するA点と段波未到達のために波速がゼロであるC点との間における線形内挿補間から未知点Pに至る移動既知点Iを求めようとしても，I点は必らずC点と同じ座標位置に求められてしまう。すなわち，段波がその下流側へ伝播することは実際上あり得ないという数値解析上の不合理を生じることになる。そこで，図－1bに示したように，急峻な波先をもつ段波の特徴を利用して，既知点Aとさらにその上流側のD点との間で波速を外挿補間させることにより移動既知点Iの座標位置を決定する整斉法を新たに導入し，ドライ・ベッド水路上においても洪水追跡が合理的に実行し得る解析モデルを作成した。

一方，このような場合には流れの場の先端条件の与え方も重要かつ難しい問題であり，従来から多くの先端条件が提案されている[3),4)]が，本報告では岩佐ら[5)]が氾濫解析で用いたように $h\leq\varepsilon$ ($\varepsilon=0.001m$) なる地点で段波未到達と仮定した単純な数値解析上の条件を準用しており，特別な先端条件を用いないことにした。したがって，初期条件としてもドライ・ベッド水路上の場合には $h=\varepsilon$, $v=Q=0$ と仮定した。

3. 室内実験結果との比較検討

実験は，幅20cm，高さ40cm，長さ21.4m，水路床勾配1/1000のアクリル製矩形水路を用いて行い，上流端において流量を0から16.1ℓ/sへと4種類の立上り時間で急増させ（この後は一定），数カ所において容量式波高計による水位測定を実施した。

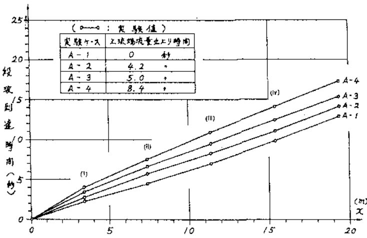


図-2 段波到達時間（実験結果）

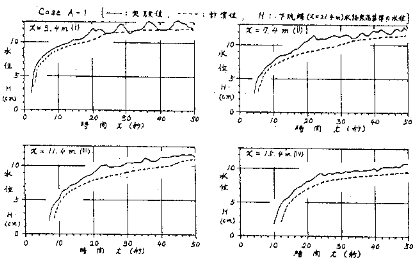


図-3 実験値と計算値の比較

図-2は，この結果得られた段波到達時間特性である。流量立上り時間の差異による段波到達時間差は断面(ii)地点までに決まり，その下流側ではほぼ同じ伝播速度となっている。また，この際の先端伝播速度は最大流量（16.1ℓ/s）時の等流々速の2倍近い大きさである。一方，図-3はA-1の場合を一例として実験値とシミュレーション結果との比較を示したものである。実験値に比べて計算値は伝播速度が少し遅いようであるが，この場合，計算上採用されている粗度係数 $n=0.0081$ の値が若干過大評価されているとも思われる。しかし，少なくとも本解析モデルの再現性についてはほぼ良好な結果が得られたと考える。

4. 実際河川への適用

表-1 解析領域区分

領域区分	距離X (Km)	平均河床勾配	粗度係数 n	初期流量(m³/s) あり	初期流量(m³/s) なし
Ⓘ	0 − 16	1/130	0.035	3 − 6	(ドライ・ベッド)
Ⓘ	16 − 21	〃	0.025	6	
Ⓘ	21 − 25	〃	〃	22	
Ⓘ	25 − 30.6	1/1040	0.035	22	

本解析モデルを図-4に示すような延長約31kmのT河川に適用してみた。この解析対象領域は，与えられている諸条件から表-4のような領域区分が可能であり，昭和52年8月の既往洪水を模擬して，上流Tダム放流量を瞬間的に290m³/sに急増（後は一定）させた場合を想定し，平年時の初期流量がある場合とない場合（ドライ・ベッド）との2種類の初期条件のもとにシミュレーションを行った。図-5と6はこの結果得られた段波下流端到達時の最大上昇水位と段波到達時間であり，かなり良好な再現性が得られた。一方，図-7は段波到達時間特性を示したものであり，段波伝播速度に対しては水路床勾配の影響が顕著であるのに比べ，ダム落差工の有無や粗度係数の変化による影響は少ないなどの特性が明らかにされた。

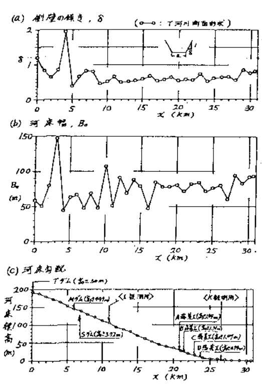


図-4 T河川形状

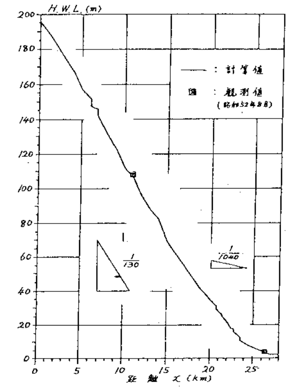


図-5 最大上昇水位

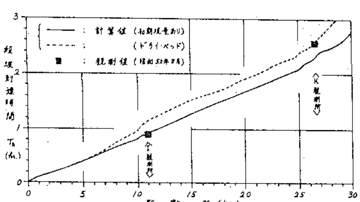


図-6 段波到達時間

5. まとめ

ドライ・ベッド水路においても特性曲線法による洪水追跡を合理的に実行するために，波速の外挿補間に基づく解析モデルを新たに導入したところ，室内実験および実際河川の観測値との比較検討により本解析手法は良好な適用性を有することが示された。

最後に，本研究を進めるにあたり，東京大学工学部 玉井信行助教授には貴重な御助言を頂き，また竹内明文氏（当時，芝浦工業大学工学部学生）には実験遂行上の熱心な御協力を頂いた。ここに記して，心よりの謝意を表する次第であります。

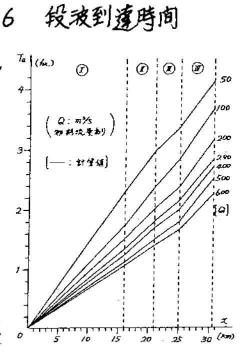


図-7 段波伝播特性

— 参考文献 —

1) 玉井信行，河西基：「河道狭窄部が洪水波形に及ぼす影響について」，第22回水理講演会論文集，PP.239～244，1978-2.
2) 荻原能男：「流出現象の非定常解析」，土木学会水工学シリーズ，77-A-3，PP.A.3.1－A.3.14，1977-7.
3) 松冨英夫：「ドライ・ベッド上のダム破壊流れの数値解析」，第26回水理講演会論文集，PP.409－416，1982-2.
4) 後藤智明，首藤伸夫：「各種津波遡上計算法と波先端条件の比較」，第27回海岸工学講演会論文集，PP.80～84，1980.
5) 岩佐義朗，井上和也：「氾濫水の水理の数値解析モデル（その2）」，第17回自然災害科学総合シンポジウム，PP.241－244，1980-10.