

河道・貯水池系の洪水伝播解析
Analysis of Flood Propagation in Channel-Reservoir System

財団法人 電力中央研究所 正員 河西 基
財団法人 電力中央研究所 正員 白砂 孝夫

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、より細密な洪水放流操作方法の確立あるいはダムからの急激な洪水放流に対する下流河川の警報体制の整備などが緊要な課題となっている。このため、複雑な河道、境界条件等が多く含まれるダム下流河川における洪水伝播現象を解明し、さらに河道・貯水池系を総合的に洪水追跡し得る解析システムとして体系化することが今日的に重要と思われる。

そこで上述のような視点に立つて、本報告においては、先ずドライ・ベッド水路あるいはダム（堰）・貯水池などが点在している複雑な河道区間において洪水が段波状を呈して流下する現象を取扱うこととし、このような問題に対しても合理的な洪水追跡を実行し得る特性曲線法に基づく解析モデルを作成した。特に、特性曲線法において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為に通常よく用いられている波速の内挿補間に基づく特性曲線網の整齊手法¹⁾がドライ・ベッド水路上の段波現象に対しては不合理なことが明らかとなり、この種の問題にも適するような波速の外挿補間に基づく整齊手法を導入した解析手法を新たに提案した²⁾。一方、種々の条件における室内実験結果および実河川での観測値との比較・検討により本解析モデルの妥当性を検証した。

2. 解析モデルの内容

本報告においては、一次元漸変不定流の基礎方程式を段波解析に適用するに際して、特性曲線法に基づく数値解析を用いているが、これらの解析手法の概略を以下に述べる。

2.1 基礎方程式と特性方程式

まず基礎方程式としては、台形断面水路を対象として水路幅の変化を陽に考慮した次式を用いる。³⁾

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

[運動量方程式] : $\xi \frac{\partial v}{\partial t} + \xi \cdot v \frac{\partial v}{\partial x} + g \xi \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{g}{T} \{ \sin \theta \cdot B_0 - \frac{\eta}{2} \cos \theta \cdot h + \sin \eta_\theta \cdot h \} - \frac{1}{T} (B_0 + \cos \eta_\theta \cdot sh) \left(\frac{\tau_o}{\rho h} \right)$ (2)

ここに、 $\xi = \{ B_0 + (\delta_1 + \delta_2) h / 2 \} / \{ B_0 + (\delta_1 + \delta_2) h \}$ (3), $T = B_0 + (\delta_1 + \delta_2) h$ (4),
 $\eta \equiv 4 B_0 / \Delta x$ (5), $\eta_\theta \equiv \tan^{-1} (\eta / 2)$ (6), $S = \sqrt{1 + \delta_1^2} + \sqrt{1 + \delta_2^2}$ (7)
 $\tau_o = \rho g n^2 v^2 / R^{4/3}$ [Manning の抵抗則](8)

h : 水深, v : 断面平均流速, x : 距離, t : 時間, g : 重力加速度, τ_o : 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, θ : 水路床勾配, n : 粗度係数, R : 径深であり、上式から次の特性方程式が導かれる。ただし、簡単のために $\sin \theta \div \theta$, $\sin \eta_\theta \div \eta / 2$ に近似できるとして記述する。

$\left\{ \begin{aligned} dx/dt &= v \pm \sqrt{\xi g h} \quad (\equiv w^+, w^-) \quad \text{.....(9)} \\ dv \pm \sqrt{\frac{g}{\xi h}} dh &= \frac{1}{T} \left[\eta h v \left\{ \frac{v}{\xi h} \mp \sqrt{\frac{g}{\xi h}} \right\} - \frac{\eta}{\xi} v^2 + \frac{g B_0}{\xi} \theta - \left(\frac{\tau_o}{\rho \xi} \right) \left\{ \frac{B_0}{h} + S \right\} \right] dt \quad \text{.....(10)} \end{aligned} \right.$

ここに、上式において複号は同順であり、(9)式は波速 ω ($x \sim t$ 平面での特性曲線 c^+ と c^-) を表わす。

2.2 特性曲線網の整齊

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、(9)式で与えられる波速に関して図-1aに示されるような内挿補間に基づき規則的な特性曲線格子網を構成する整齊手

法が通常よく導入されている。¹⁾例えば、上流側から下流側へ向う特性曲線 c^+ に関しては、固定の未知格子点Pに到達するように移動させた既知点I(X_I, t_j)のx座標位置を次式から求めることができる。⁴⁾

$$X_I = \frac{X_P + (\omega_c^+ \cdot X_A - \omega_A^+ \cdot X_c) \Delta t / \Delta x}{(\omega_c^+ - \omega_A^+) \Delta t / \Delta x + 1} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、下添字は各格子点位置を示し、また $\Delta x / \Delta t$ は次式のC.F.L.の安定条件

$$\Delta t / \Delta x \leq 1 / (v + \sqrt{g h}) \dots\dots\dots(2)$$

を常に満足するように自動的に選ばれているものとする。

しかしながら、本報告でも対象としているドライ・ベッド水路上の段波現象のような場合においては、流れ先端部の流況は急峻かつ複雑となって数学的特異点を伴うとされており、⁵⁾数値解析上においても困難な問題が多い。⁶⁾この場合、上述の内挿補間に基づく特性曲線網の整備を導入した手法を用いる際にも、次のような数値解析上の不合理を生じることが示される。すなわち、図-1aを参照して、既知時刻ステップ t_j において段波先端が格子点Aまで既に到達している時、A点と段波未到達の格子点Cとの間での波速の内挿補間関係を用いて未知点Pに到る移動既知点Iの座標位置を(1)式から求めると、 $\omega_c^+ = 0$ であるから $X_I \rightarrow X_P (= X_c)$ となる。したがって、移動既知点IはIIと共に必ず格子点Cと一致せざるを得ず、このC点においては段波未到達のために各水理量の値がゼロであることから、結果的に段波が未知点Pに到達することは理論上あり得ないことになってしまう。

そこで、この矛盾点を解消するために、図-1bに示したように既知点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備手法を新たに導入した。²⁾物理的には、この結果求められる移動既知点Iにおいて段波の先端が形成されていると解釈することもでき、急峻な波先をもつ段波の特徴が比較的よく表現された形式となっている。また、具体的には(1)式において下添字をA→D、C→Aと変換することにより図-1bに対応する外挿補間に関する式となる。

一方、ドライ・ベッド水路上の流れの先端条件に関しては、従来から津波あるいはダム破壊問題などを対象とした多くの先端条件が提案されているが、^{5)~7)}ここでは岩佐らが汎濫解析で用いたように $h \leq \epsilon$ ($\epsilon = 0.001$ m)なる地点で段波未到達であると仮定した数値解析上の簡明な条件のみによることとした。この ϵ として用いた数値に関しては明確な根拠が与えられているわけではないが、数値的にほぼ‘流れなし’と考え得るだろうということと、さらに本報告で実施した数値解析上においても段波先端の伝播状況として比較的安定した結果が得られており、それほど無理な仮定ではないと思われる。

2.3 河道・貯水池系としての洪水追跡の計算スキーム構成

本報告では、ドライ・ベッドおよびダム(堰)貯水池が点に在る河道を1つの河道・貯水池系として定義することとし、その中での洪水追跡を系統的になし得る計算スキームを作成したので、以下にその概略を述べることにする。

まず、初期条件に関しては基本的に不等流水面形計算に基づくものとするが、ドライ・ベッド状態の地点においては不定流計算との整合性から $h = \epsilon$ ($Q = v = 0$)と仮定する。ドライ・ベッド水路上の不定流計算に関しては2.2節で述べた方法に従うものとする。また、境界条件に関しては水位、流量あるいは水位～

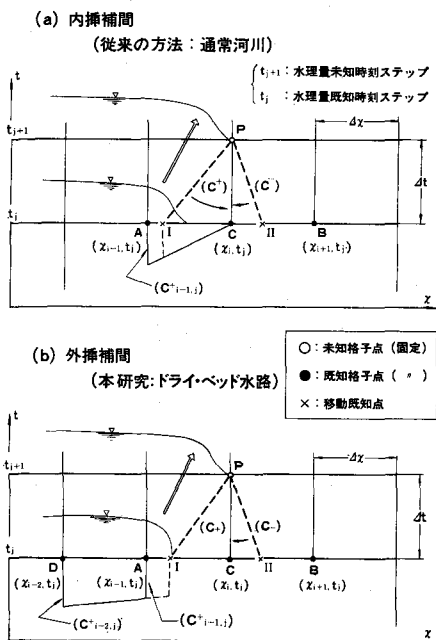


図-1 特性曲線網の整備

流量関係のいずれかが一般的に与えられる。

一方、対象河道

区間の途中にダム(堰)が存在している地点における計算スキームの概略を示したのが図-2である。ここでは、

通常の境界条件と

しての取扱いが概念上取り入れられる。すなわち、ダム地点の上流面は下流端としてまた下流面では上流端境界にそれぞれ対応し、一般的に前者では $H \sim Q$ 関係が与えられ、さらにダムを越流する際にはその越流量 Q を用いて後者の計算を行う。

以上のようなことを特に考慮して河道・貯水池系における洪水追跡を系統的に実行し得るように構成した本解析モデルの計算 flow を示したのが図-3である。

N : 水路分割数 (= 水路長 / Δx),
 k : 第 k 番目の中間ダム, M : ダムの全個数
 格子点 $\begin{cases} D \rightarrow i-1, & A \rightarrow i, & C \rightarrow i+1 \\ B \rightarrow i+2, & P \rightarrow i+N+1, \\ C' \rightarrow 2(N+1)+k, & P' \rightarrow 2(N+1)+k+M \end{cases}$
 番号 (x)

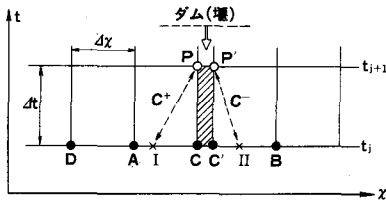


図-2 ダム地点の計算スキーム

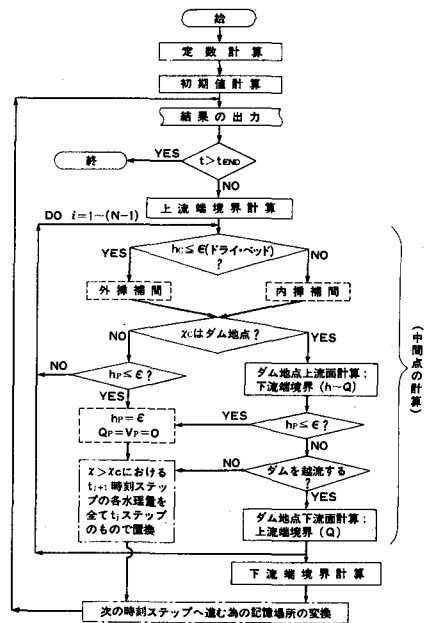


図-3 本解析モデルの流れ図

3. 実験結果との比較・検討

3.1 室内実験の概要

実験は、幅 20 cm、高さ 40 cm、長さ 21.4 m、水路床勾配 1/1000 のアクリル製矩形水路において数種類の水路条件を設定して行った。ヘッドタンク内の水位は一定を保つようにされており、また通常の流量調節用バルブの外に急開閉バルブを用いて所要の流入流量波形が与えられるようにした。水位変化は、主として 6 地点に設置した容量式波高計を用いているが、ケースによっては連続写真撮影を併用して測定した。一方、本実験の範囲内においては Re 数 = 7000 ~ 30000 となっており、ほぼ遷移領域に属する流れと判断されるので一定の抵抗係数を与えるのは必ずしも適当でないが、8 % 程度以内の誤差が含まれることを前提として背水計算から推定された Manning の粗度係数の平均値 $n = 0.0081$ を採用することにした。

3.2 ドライ・ベッド水路上の段波

まず、図-4 はドライ・ベッド水路における段波先端の伝播特性に関する実験結果の 1 例を示したものである。流量立上り時間の差異による段波到達の時間差は (ii) ~ (iii) 断面までにほぼ決定され、その下流側では同程度の伝播速度 $\omega \div 1.4 \text{ m/s}$ で等流々速の 2 倍以上の大きさとなっている。一方、図-5 a は A-1 のケースについて水位変化の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。実験値と比較して計算値の方が伝播速度は小さいようであるが、上述の粗度係数の誤差範囲に見合う程度の差であり、ほぼ良好な適用性が得られたと考える。ただし、下流端境界条件としては $x = 19.4 \text{ m}$ 地点における $H \sim Q$ 関係を与えた。

3.3 貯水池内における段波

水路下流端 ($x = 21.4 \text{ m}$) 地点に高さ 11 cm の堰板を設置した上で、その中に静水を満杯状態にして模擬

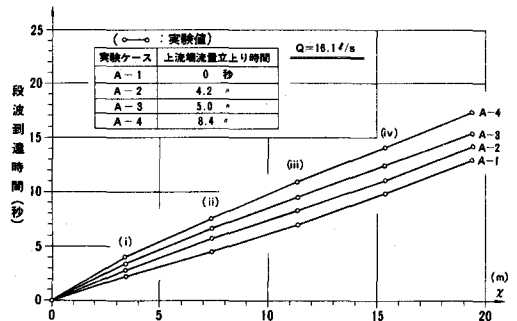


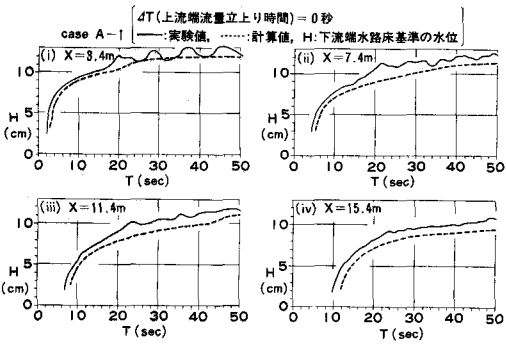
図-4 段波到達時間 (ドライ・ベッド)

された貯水池内における段波の実験値と計算値を比較した1例を示したのが図-5bである。段波先端が到達してから、さらに水路下流端の堰からの反射波が上流側に伝わって行く様子などが比較的よく再現されているものの、反射波の大きさが計算値の方では過小評価される傾向が示されている。一方、この場合の実験では、初期水深が相対的に大きいので上流側の流量立ち上がり時間の影響を受けるのは上流側のみであって、完全に発達した段波先端を形成するのが比較的早くなっている。そこで、従来の理想段波としての取扱い⁹⁾

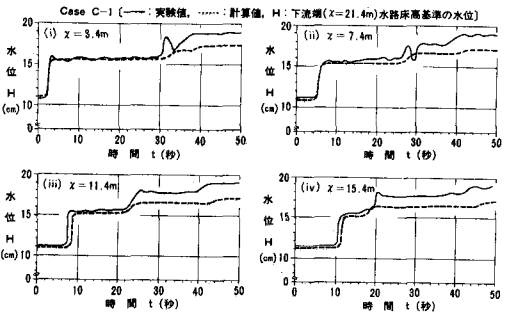
$$\omega = v_1 + \sqrt{gh_1} \left(\frac{h_2}{2h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \right)^{1/2} \dots\dots\dots (13)$$

(添字1,2はそれぞれ段波到達前後を示す。)
 による検討を行ったところ、下流方向への初期水深の増加に伴う段波伝播速度の増大傾向などが実験値とかなり良好な一致をしている結果も得られた。

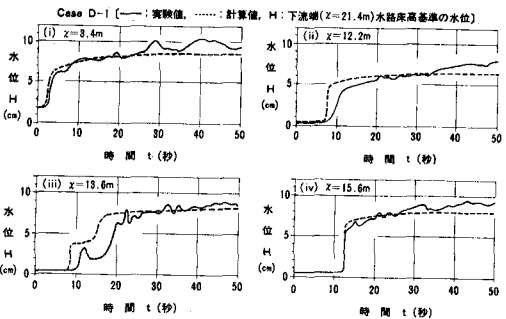
3.4 ドライ・ベッド～貯水池における段波
 ドライ・ベッドから貯水池に変化している水路における段波の変形に関して実験値と計算値を比較したものが図-5cである(水路形状に関しては図-6を参照されたい)。(i)は上流側のドライ・ベッドに、また(ii)～(iv)は貯水池の初期条件に対応する地点である。貯水池流入部付近に相当する(ii)～(iii)の地点において段波到達後の初期段階での波形は実験値よりも計算値の方が大きくかつ早目に伝播しているが、その前後では比較的よく一致した結果を示している。この場合においては、貯水池流入直後の(ii)地点までの段波先端速度はその上流のドライ・ベッド水路における伝播速度の約1/2に減少しており、それから(iii)地点までの初期水深増加区間でその半分程度の速度が回復し、さらにダム(落差)地点の越流時に若干また減少するような傾向が示された。この中で特に、最初の貯水池流入部近傍における伝播速度の減少に関しては、段波流入水の運動量拡散による水クッション的な効果が大きく作用しているものと思われる。一方、この場合の $x > 13m$ の貯水池区間においては跳水と見られる現象が生じており、図-6ではそれが顕著に示されている。本解析モデルにおいては、常流と射流が混在する場合にも対応し得る特性曲線網の整齊手法を用いているので、このような場合に対し



(a) ドライ・ベッド (A-1) : $Q = 16.1 \text{ l/s}$



(b) 貯水池内 (C-1) : $Q = 1.16 \text{ l/s}$



(c) ドライ・ベッド～貯水池 (D-1) : $Q = 9.7 \text{ l/s}$

図-5 実験値と計算値の比較(水位変化)

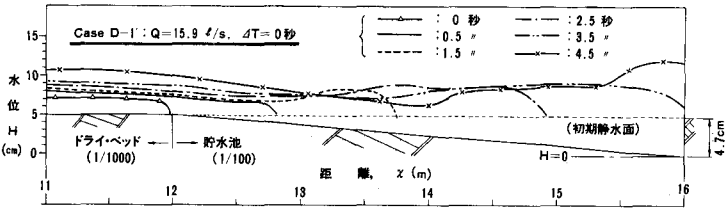


図-6 ドライ・ベッド → 貯水池における段波伝播(実験値)

でも基本的にはシミュレーションが可能となっている¹⁰⁾。ただし、段波先端部の数値解析上の取扱いについて Sakka⁶⁾が述べているように、数値計算の不安定さを避ける意味から時間ステップ Δt を通常より小さ目にとるなどの考慮も場合によっては必要であろう。また、この場合に関しては特に、貯水池を模擬するために設けた水路の段差が小さく十分な貯水池モデルとなっていないので定量的な評価に関しては議論の余地があると思われる。

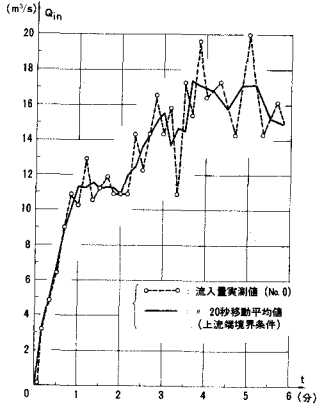
4. 実河川への適用

本解析モデルの適用性に関しては、上述の室内実験結果との比較・検討などによりほぼ妥当な精度を有することが確認されたが、さらに実際の河川におけるドライ・ベッド水路上の段波実験および河道・貯水池系での出水に対して適用した結果について以下に述べる。

4.1 ドライ・ベッド水路上の段波

昭和56年4月23日に北海道電力・真敷別発電所余水路の放流実験

を実施した際に減勢工出口から本川（石狩川水系・陸満別川）に合流するまでのドライ・ベッドの自然河床上における放流水段波の伝播現象を観察した。対象とした水路の区間長は約60mであり、5地点で与えられている断面図より解析上の等価台形断面に変換した。河床勾配は上流端より $x=55m$ まで $1/35$ から $1/75$ へと少し緩かになるが、 $x>55m$ では $1/10$ と急である。また、河床幅



は約7m、水路側壁勾配については 図-7 放流量（上流端） $\delta=2.5$ のそれぞれ近傍の値となっている。粗度係数については河床状況から $n=0.045$ を推定値として与えた。図-7は放流工出口の堰越流水位から換算して求めた上流端境界条件としての流量変化である。距離ステップ $\Delta x=2.5m$ で計算した結果の水位変化と段波伝播速度に関して、実験値との比較を図-8および図-9にそれぞれ示した。データとして与えられている断面定数等がどちらかと言えば粗い割には、かなり良好な再現性が得られている。また、段波先端の近傍においては1よりやや大きなフルード数の状態で伝播しており、さらに $x=55m$ 前後より下流においては段波到達後の流れが常に射流状態であることが計算結果として示された。

4.2 河道・貯水池系における段波

河道・貯水池系の1例として図-10に示すような延長約31kmのT河川に適用した結果を述べる²⁾。この解析対象領域は、与えられている諸条件から表-1のような領域区分がなされるが、このうちⅡとⅢの区間においては河川改修が進んでいる。また、この河川区間の中には多数のダム、落差工が点在しており、一連の河道・貯水池系を形成している。シミュレーションは、昭和52年8月の既往出水を模擬して、上流のTダムから瞬間的に $290m^3/s$ が放流された（その後は一定）場合を想定し、さらに初期条件としてダム・落差工による貯水が有る区間

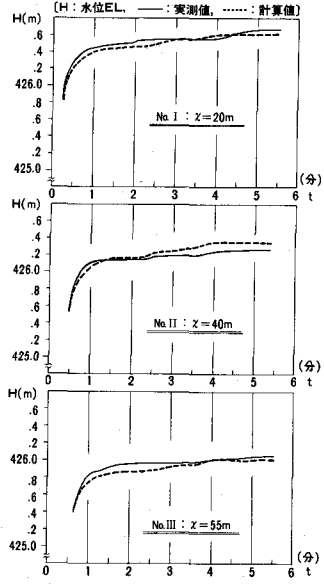


図-8 水位変化

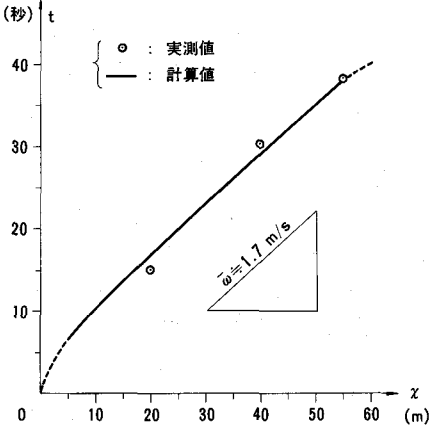


図-9 段波先端速度

以外はドライ・ベ

ッドとした場合と、
平水流量が流れて
いる場合の2ケー
スについて計算を

行った。初
期条件に関
しては、夏
季の当該河
川でドライ・
ベッド状態
の区間が一
般的に多い

ことを考慮

したものである。図-11と図-12はこの結果得られた段波到達時間と最大上昇水位であり、比較的良好な再現性が得られている。この場合の伝播速度に関しては、河床勾配の影響が大きく寄与し、下流側で小となる傾向は流量が大きい程顕著なこと、あるいは3.4でも述べたようにダム越流時に多少遅れる特性が認められた。一方、ほぼ一様な形状とみなせる17km<X<20km区間におけるドライ・ベッド水路として解析した数ケースの流量に対する段波先端速度の結果は、各対象流量の等流流速にかなり近い値として得られた。

5. あとがき

ドライ・ベッド水路やダムなどが点在する河道・貯水池系に対しても洪水追跡を合理的に実行する為に、特性曲線法に基づく解析モデルを新たに作成し、その良好な適用性を得ることができた。今後、洪水警報体制の確立などに資するために、さらに有用な解析モデルに発展させたいと考えている。

最後に、現地実験等については北海道電力株式会社土木部水路課の多大なる御協力を載いた。ここに記して、関係各位に心よりの謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 萩原能男：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.
- 2) 河西基，白砂孝夫，五十嵐由雄：特性曲線法によるドライ・ベッド水路上の段波伝播解析，第37回土木学会年講，pp.275-276，1982-10.
- 3) 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.
- 4) 萩原能男，河西基：斜面流出における非線形効果に関する一考察，山梨大学工学部研究報告，Vol.27，pp.62-67，1976.
- 5) 松富英夫：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.
- 6) Sakkas, J.G. and Strelkoff, T.: Dam - Break Flood in a Prismatic Dry Channel, Proc. of ASCE, Vol. 99, HY 12, pp. 2195-2216, 1973-12.
- 7) 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.
- 8) 岩佐義朗，井 和也：氾濫水の水利の数値解析モデル(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.
- 9) 例えば，荒木正夫，椿東一郎：水理学演習(下)，森北出版，pp. 93-97，1962.
- 10) Kawanihi, M. and Tamai, N.: On the Deformation of Floods due to Bottle-Neck Valleys, International Conference on Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand, 1978-1.

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 なし
①	0-16	1/130	0.035	3-6
②	16-21	#	0.025	6
③	21-25	#	#	22
④	25-30.6	1/1040	0.035	22

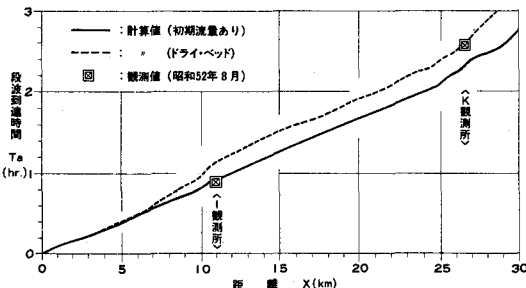


図-11 段波到達時間

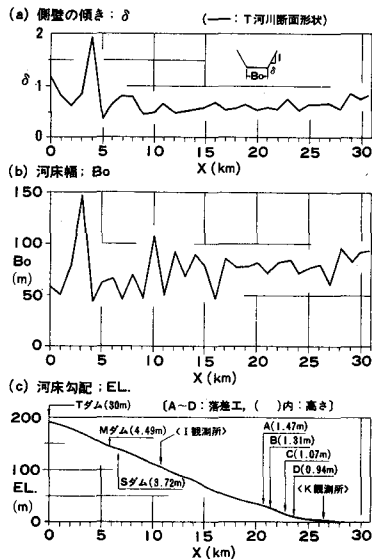


図-10 T河川断面形状

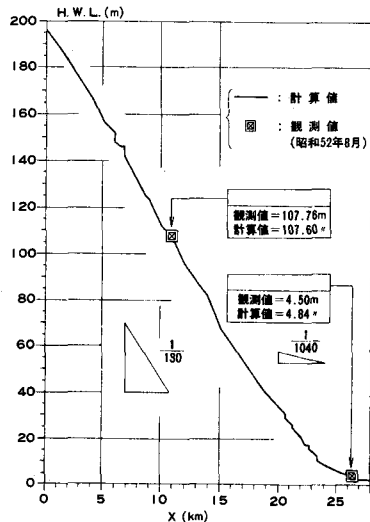


図-12 最大上昇水位