

地下水路系で生じる過渡水理現象の解析法 に関する2, 3の検討

SOME CONSIDERATIONS ON UNSTEADY FLOWS IN UNDERGROUND CHANNELS

細田 尚¹・多田彰秀²・岩田通明³・村本嘉雄⁴・古八健夫⁵

Takashi HOSODA, Akihide TADA, Michiaki IWATA,

Yoshio MURAMOTO and Takeo FURUHACHI

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 西松建設(株) 技術研究所 (〒242 大和市下鶴間2570-4)

³正会員 工修 (株) 建設技術研究所 河川本部技術第3部 (〒103 東京都中央区日本橋堀留町1-7-7)

⁴フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

⁵学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

Hydraulic transients in the underground channel system such as the underground flood way and the sewer network are investigated experimentally and numerically. The typical features of unsteady flows induced by the inflow discharge into the underground channel are clarified by the fundamental hydraulic experiments. It is also shown that the hydraulic transients with the propagation of an interface between the open channel flow and the pressurized pipe flow can be reproduced by using the numerical model. Numerical model is extended to predict the hydraulic transients with the interaction between the overland surface flow and the underground channel flow, considering the inflow and outflow discharge through manholes.

Key Words : Flood disaster, Open channel flows, Pipe flows, Sewer network, Underground flood way
Numerical analysis

1. はじめに

近年, 河川流域の著しい都市化に伴い, 豪雨時に都市域の内水による災害が頻発するようになってきている. このような状況に対処し, 都市内の治水安全度を向上させるため, 下水道網の拡充のみならず, 地下河川, 地下放水路および治水のための二層河川が数多く建設または計画されている. このような状況は, 東京や大阪のような大都市だけでなく, 中小河川流域においても同様である.

地下河川や地下水路系において考えられる水文学的課題を示せば以下になる.

Fig. 1に示したポンプ併用圧力管方式の地下河川は, 東京や大阪で建設中の大都市地下河川の典型であり, 次のような水文学的課題が考えられる.

① 地下河川が空の状態から洪水が流入し, 地下河川が満管になり, 下流端排水機場のポンプが稼働して洪水を排水するまでの過渡水理現象が十分明らかになっていない. とくに, 下流端立坑の最大水位と

水位上昇速度は立坑およびポンプ場設計の重要なパラメータと考えられ, 事前に正確に評価しておく必要がある. この場合, 空の状態から満管状態に段波を伴って急に遷移するため, 開水路流れと管路流れが共存する急変非定常流の予測法の確立が重要となる.

② ポンプ稼働時に事故などによりポンプが急停止した場合, 立坑間で急激なサージングが生じるため, 立坑の水位変動を評価する必要がある.

③ 高落差の流入立坑を洪水が安定して流下し, 圧力運転時においてもエネルギー損失が十分小さい構造, および流入初期に地下河川に大量の空気泡が入りにくい構造の開発^{1), 2)}.

そこで, 本研究では, 地下河川の洪水初期湛水過程を対象に, 開水路状態から満管状態に段波を伴って急遷移する過程を数値解析により再現するとともに, 計算結果を実験結果と比較することにより数値解析モデルを検証する.

管路流れと開水路流れの境界面の移動を伴う非定常流解析には、従来、水路全体を管路頂に物性値に応じた細いスロットを設けた開水路として解析するプライスマン法を用いることが多い³⁾。これは、管路流れの領域を圧縮性流体として解析することに対応している。しかし、立坑が複数ある地下水路の場合には、立坑部で圧力波が解放されることから、圧縮性流体として取り扱う必要はない。また、満水の管路への空気泡の侵入現象は、Benjamin⁴⁾やWilkinson⁵⁾の解析が示すように非圧縮性流体として再現されることから、本研究では境界面の移動を伴う非定常流に対して非圧縮性流体としての解析法を用いる。

渡辺⁶⁾は枝管が数多く取り付けられた下水道を対象に、プライスマン法を援用した非圧縮性流体としての解析法を提案しているが、取り付け管が存在しないか少ない場合には適用できない。そこで、上述の満水の管路への空気泡の侵入現象や立坑を有する管水路のサージングに適用された、境界面の一つひとつの移動を追跡する方法を用いる^{7), 8), 9)}。

さらに、数値解析モデルの応用として、豪雨時の地表流または河川氾濫水が下水道網へ流入する時に生じる過渡現象を取り上げ、地表流と地下水路流の相互作用を考慮した非定常流解析モデルについて考察する。

2. 地下河川における洪水の初期湛水過程

空の地下河川に洪水が流入し満管になり、排水機のある下流端立坑水位が上昇する過程について考察する。まず、現象を模擬した基礎水理実験の概要を述べる。次に、管路流れと開水路流れの状態が共存する非定常流の数値解析モデルを用いて現象を再現し、実験結果と比較することでモデルの検証を行う。

(1) 水理実験の概要

実験はFig. 2に示した水路を用いて行われた。水路を空の状態にし、片側の立坑より一定流量を流入させ、その後の流れの状況をビデオおよび写真撮影した。本実験の流入流量は $Q = 0.4 (l/s)$ である。

Photo 1に水路中央部の流れの状況を示した。流入水の前線が侵入する過程、および前線が下流端に到達した後、段波が上流に遡上する様子が理解できる。水路の水深を増加させながら両端で段波が数回反射した後、水路が満管状態になり、左右端の立坑水位が上昇していくことが分かる。

(2) 数値解析モデル

数値解析の基礎式は、水の非圧縮性を仮定した開水路流れおよび管路流れの1次元連続式と運動量方程式で構成される。Fig. 3に示した座標系の下で、解析に用いた基礎式を示せば以下のようなものである。

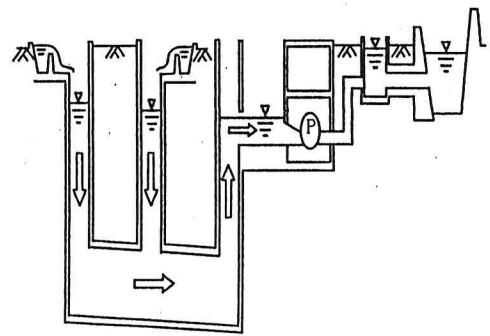


Fig. 1 Schematic illustration of a typical underground floodway in the megalopolis

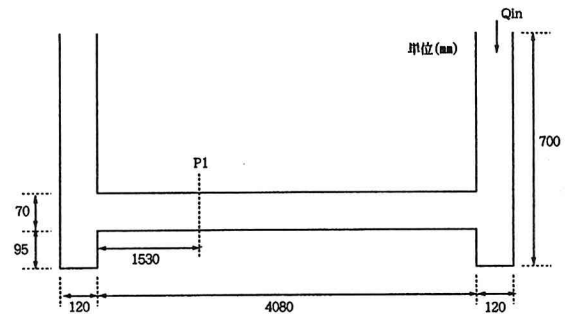


Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup



Photo 1 Invasion process of water front and the propagation of hydraulic bore

[開水路流れの連続式と運動量方程式]

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = gA (\sin \theta - \frac{\tau_b}{\rho g R}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u^2} A \right) \quad (2)$$

ここに、 Q : 流量、 u : 断面平均流速、 A : 流水断面積、 R : 径深、 $\overline{u^2}$: 断面平均乱れ強さ、 τ_b : 壁面せん断応力、 θ : 水路床勾配、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 t : 時間、 x : 空間座標を表す。

[管路流れの連続式と運動量方程式]

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_D}{\rho g} + D \cos \theta \right) =$$

$$+ gA (\sin \theta - \frac{\tau_b}{\rho g R}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\overline{u'^2} A) \quad (4)$$

ここに、 D : 管径、 p_D : 管路天端 ($y = D$) の圧力。
また、壁面せん断応力は次式のマニング則を用いて評価した。

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{gn^2 u |u|}{h^{1/3}} \quad (5)$$

本研究では、粗度係数を $n = 0.01$ としている。

Fig. 4に示した格子分割と水理量の定義位置を用いて、有限体積法に基づき基礎式を離散化し、数値解析を行う^{7), 8), 9)}。流れを管路状態、開水路状態および両者の境界面の3通りに分類し、各々に対応した基礎式を用いる。管路状態には式(3), (4)を用い、連続式を満足するように圧力を収束計算により求める非圧縮性流体の非定常解析法¹⁰⁾を用いる。開水路状態には式(1), (2)を用い、洪水氾濫水の解析法を適用する。運動量方程式の慣性項の離散化には、流れの不連続部での数値振動を防ぐためHarten¹¹⁾のupwind TVDスキームを用いている。

境界面の流量については、Fig. 4を参照して管路における式(4)と開水路における式(2)を境界面近傍で積分して得られる式(6)を離散化した。

[境界面の運動量方程式]

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + (uQ)_{x_{i+1/2}} - (uQ)_{x_{i-1/2}}$$

$$+ gA_{x_i} \left\{ h_{i+1/2} - \left(\frac{p_D}{\rho g} + D \right)_{i-1/2} \right\} = gA_{x_i} \Delta x \left(\sin \theta - \frac{\tau_b}{\rho g R} \right)_{x_i}$$

$$+ (-\overline{u'^2} A)_{x_{i+1/2}} - (-\overline{u'^2} A)_{x_{i-1/2}} \quad (6)$$

以上の解析法の中で、渦動粘性項は次式で評価した。

$$\frac{\partial}{\partial x} (-\overline{u'^2} A) = \frac{\partial}{\partial x} (AD_h \frac{\partial u}{\partial x}), \quad D_h = \alpha h |u| \quad (7)$$

ここで、 $\alpha = 0.05$ を用いた。

(3) 計算結果と実験結果の考察

$\Delta x = 0.04(m)$, $\Delta t = 0.01(sec)$ として数値解析を行い、実験結果と比較した。Fig. 5に管路内の水深の分布を示した。流入立坑から円管路内に流入水の前線が侵入する過程、および前線が下流端に到達した後、段波が上流に遡上する様子が再現されている。その後、水路の水深を増加させながら両端で段波が数回反射した後、水路が満管状態になり、左右端の立坑水位が上昇している。

Fig. 6には、Fig. 2の左右立坑および位置P1での水深の時間変化について実験結果と計算結果の比較を示した。両者はほぼ適合している。

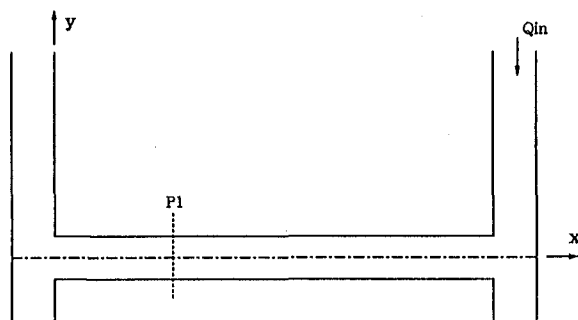


Fig. 3 Coordinate system

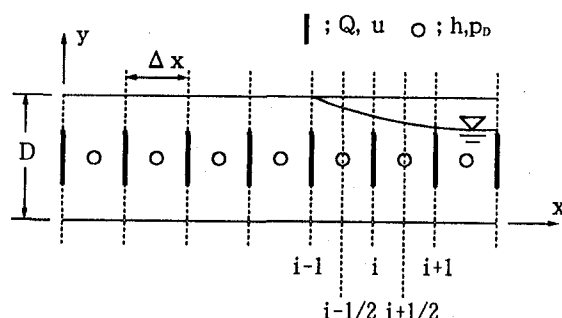


Fig. 4 Arrangement of hydraulic variables

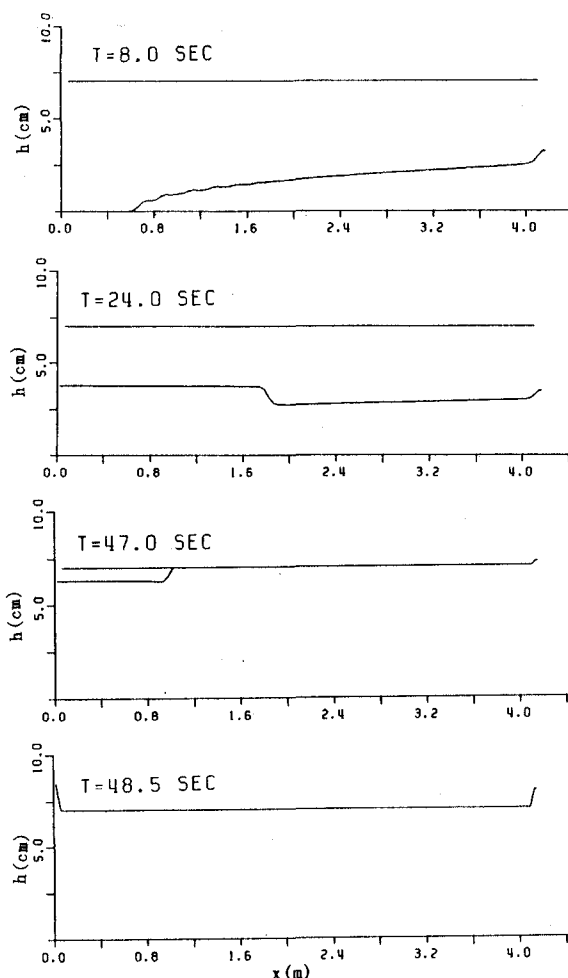


Fig. 5 Calculated results of depth distributions in the circular conduit

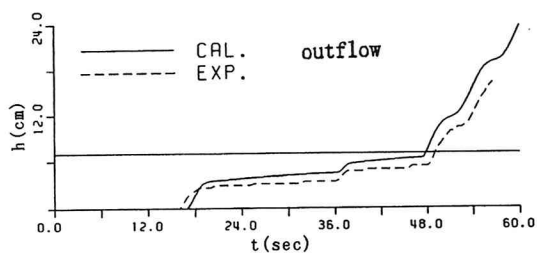
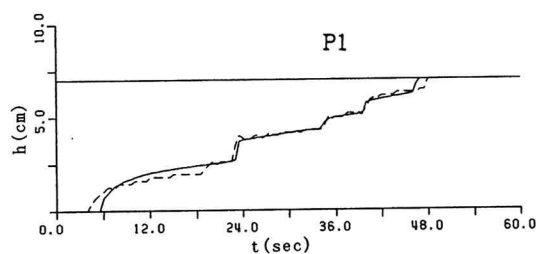
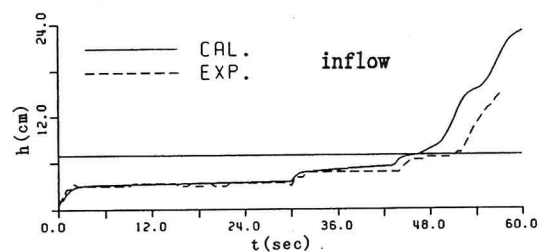


Fig. 6 Temporal depth variations at the inflow and outflow vertical shafts and P1

3. 地表流と地下水路流の相互作用を考慮した非定常流解析

数値解析モデルの応用として、豪雨時の内水による地表流または河川氾濫水が下水道網へ流入する時に生じる過渡現象を取り上げ、地表流と地下水路流の相互作用を考慮した非定常流解析モデルについて考察する。

(1) 対象とする現象

Fig. 7に示した実験装置を考え、上部水槽の左側半分に湛水する。さらに、仕切り板を瞬間的に引き上げることでダム破壊流れを発生させた。流れのフロントが進行するときに水槽右半分と連結した立坑から下部の管水路に水が流入する。

このような水理実験で生じる現象を、数値解析モデルを用いて再現する。

Photo 2に流れの状況を示した。Photo 2(a)は水路中央付近、(b)は下流端付近の流況である。流れのフロントの侵入とともに立坑を通じて下部管水路に水が流入する様子、下流端で上部の流れが反射し段波が遡上するとともに下部管水路も流入量が増加

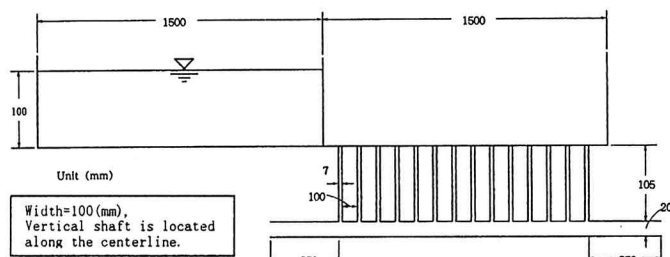
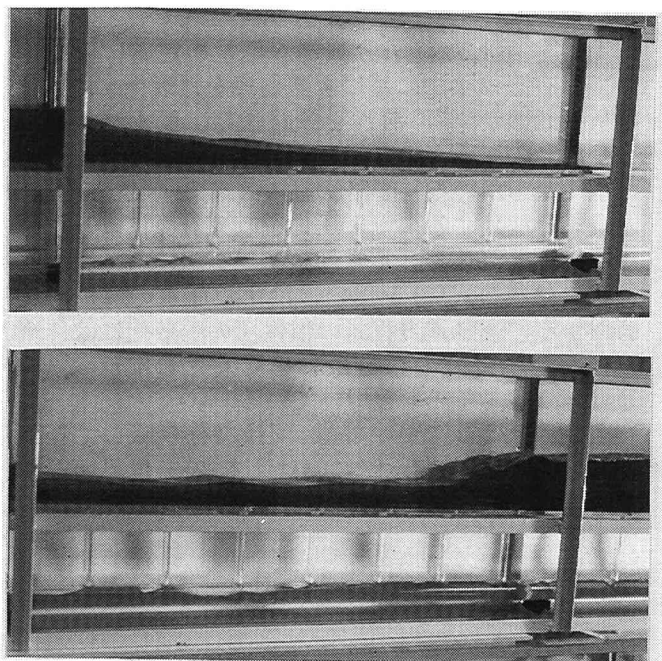
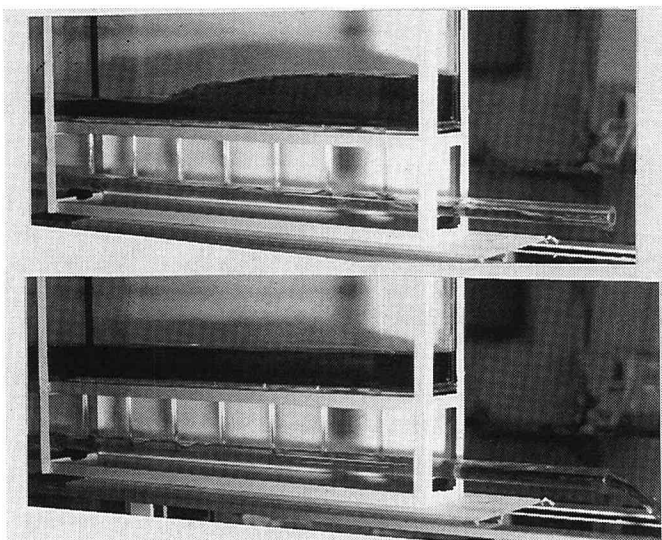


Fig. 7 Experimental setup for the unsteady flow with the interaction between the surface flows and the underground channel flows



(a) Center part of the channel



(b) Downstream end of the channel

Photo 2 Invasion of the surface flow in the upper channel and the inflow into the lower circular conduit

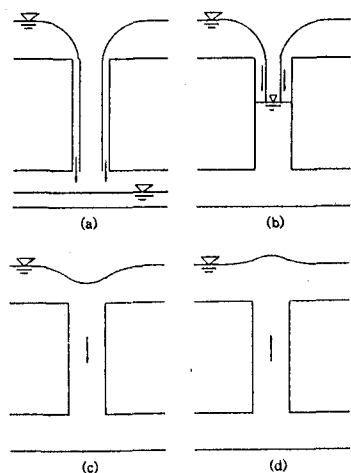


Fig. 8 Classification of the flow pattern at the vertical shafts

して満管状態になり、さらに立坑も水で満たされ上部と下部が一体となっていくことが確認される。下流端では、上層流のフロントが到達後しばらくして下部管水路末端から水が流出している。

(2) 数値解析モデルによる再現計算

本研究の数値解析モデルを応用して、現象の再現を試みる。上部流れに対しては開水路状態の解析法を、下部管水路に対しては管路流れと開水路流れが共存する非定常流解析法を適用し、両者間が立坑を通じた流出入で相互作用するように数値解析モデルを改良した。ただし、空気は流れに影響を与えず管内から抜けていくと仮定し、モデル化していない。

流出入の流量は、立坑近傍の流況をFig. 8のように分類して計算する。Fig. 8(a), (b)の場合には上部水深からきまる流量が下部に流入する。この場合の流入流量は次式で計算した。

$$q = a(2\pi \frac{d}{2})\sqrt{gh_u h_u} \quad (7)$$

ここに、 a は定数であり本計算では試行錯誤的に0.05とした。

Fig. 8(c), (d)は立坑が水で満たされ上部と下部が一体となった場合であり、上部から下部または下部から上部への流出入流量は立坑を挟む下部管水路の流量差で定められる。この際、立坑部の圧力水頭（立坑水位）は管路、立坑高さおよび上部開水路流れの水深の和として管水路の流量を計算している。

(3) 計算結果の考察

Fig. 9に、湛水深を10cmとした場合の仕切り板急開後の水深分布を示した。上部水槽での流れが右側に侵入するとともに、立坑から下部管水路に水が流入して水深が増加し、管路流れと開水路流れが共存する流れが生じる様子が再現されている。さらに、上部流れの先端が下流端に到達後、段波が発生、遡上している。この段波の遡上と同時に下部管水路の水深も急増し、立坑が水で満たされ下部と上部流れ

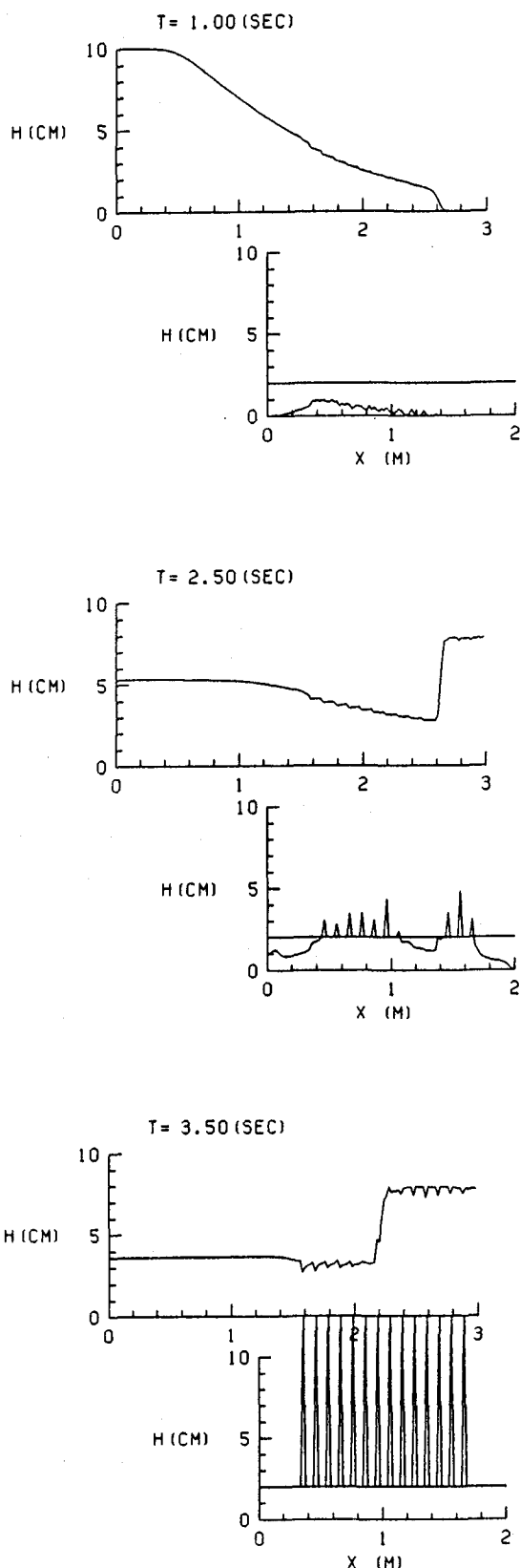


Fig. 9 Calculated results of the depth distributions in the upper and lower channel

が一体となっている。

このように、定性的ではあるが水理実験で生じた流れが数値解析モデルを用いて再現されており、モデルの有効性が示されたと考えられる。今後、より定量的な検証を行いたい。

4. おわりに

本研究は、洪水時に地下河川や下水道網などの地下水路系で生じる基本的な過渡水理現象を基礎水理実験から考察し、現象を予測するための数値解析モデルを計算結果と実験結果を比較することにより検証したものである。得られた結果をまとめれば以下のようなになる。

- (1) 地下河川については、空の地下河川内に洪水が流入することにより生ずる、初期湛水時の過渡現象を取り上げた。基礎水理実験により現象を把握するとともに、管路・開水路境界面の伝播を考慮した非定常流解析モデルを用いて数値解析を行い、実験結果と比較することによりモデルの検証を行った。
- (2) 下水道網に関しては、豪雨時の地表流または河川氾濫水の下水道への流入時に生じる非定常流を考え、現象を模擬した水理実験を行い生じる流れを把握した。
- (3) また、数値解析モデルを改良し、地表流と地下水路流の相互作用を考慮した数値解析モデルを開発し、実験結果が少なくとも定性的には再現されることを検証した。

今後、地表流と地下水路流の相互作用を考慮した数値解析モデルの定量的検証を行うとともに、実流

域への適用を試みたい。

参考文献

- 1) 栗城 稔・木内 豪・田中義人：圧力式地下河川の流入立坑のエネルギー損失特性, 土木技術資料 36-8, pp. 42-47, 1994.
- 2) 戸田圭一, 井上和也, 大本雄二, 府川 新：地下河川の流入立坑部の水理特性, 京都大学防災研究所年報 第39号B-2, pp. 483-497, 1996.
- 3) 例えば 豊國永次：都市流出システムのモデリング, 1982年度(第18回) 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, pp. A-3-1~A-3-20, 1982.
- 4) Benjamin, T.B. : Gravity current and related phenomena, J. Fluid Mech., Vol. 31, pp.209-248, 1968.
- 5) Wilkinson, D.L. : Motion of air cavities in long horizontal ducts, J. Fluid Mech., Vol. 118, pp.109-122, 1982.
- 6) 渡辺政広, 江藤剛治, 室田 明：取付管の調圧効果を考慮した下水管網内の遷移流計算法, 土木学会論文集, No.411/II-12, pp.81-91, 1989.
- 7) 細田 尚, 井上和也, 多田彰秀：管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非定常流の数値解析法, 京都大学防災研究所年報 第36号B-2, pp. 593-605, 1993.
- 8) 細田 尚, 多田彰秀, 井上和也, 北原政宏：管路・開水路流れ境界面の伝播を伴う急変非定常流の解析法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.89-97, 1994.
- 9) 多田彰秀, 細田 尚, 井上和也, 北原政宏：管路・開水路流れ境界面の発生する管水路のサージ現象, 京都大学防災研究所年報, 第37号B-2, pp. 475-488, 1994.
- 10) Hirt, C. W. and J. L. Cook : Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, J. Computational Physics, Vol.10, pp.324-340, 1972.
- 11) Harten, A. : High resolution schemes for hyperbolic conservation laws, J. Computational Physics, Vol.49, pp.357-393, 1983.

(1997. 9. 30受付)