

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法

Hydraulic Transients with Interaction between Overland Surface Flows and Underground Channel Flows

細田 尚*・多田彰秀**・岩田通明***・村本嘉雄****・古八健夫*****

Takashi HOSODA, Akihide TADA, Michiaki IWATA, Yoshio MURAMOTO and Takeo FURUHACHI

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

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

*** 正会員 工修 (株)建設技術研究所 東京支社 (〒103 東京都中央区日本橋堀留町 1-7-7)

**** 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***** 正会員 工修 (株)間組 (〒107 東京都港区北青山 2-5-8)

Hydraulic transients in the underground channel system such as underground flood ways and sewer networks 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 shown that the hydraulic transients with the propagation of an interface between open channel flows and pipe flows can be reproduced by using the numerical model. The fundamental numerical model is refined to predict the interaction between overland surface flows and underground channel flows, considering the discharge through manholes. The pressure change of air confined in the underground channel is also considered in the model to reproduce the spout of underground flows over the land surface through manholes.

Key Words : urban storm drainage model, open channel flows, pipe flows, numerical analysis, flood disaster

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、下水道の整備だけでなく、地下河川、地下放水路および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。

本研究は、このような豪雨時に都市内で生じる過渡水理現象のうち、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高精度の非定常流解析モデルを作成し、検証することを目的としている。特に、地下水路から地表への急激な噴水現象を基礎水理実験で再現するとともに、数値解析により現象を再現するためには、管内に閉じこめられた空気の圧力変化を考慮する必要性を指摘する。

まず、本研究で用いる、管路流れと開水路流れが共存する急変非定常流に関する基本的な数値解析モデルの概要を述べる。その後、地表流の発生と下水道などの地下水路への流入を模擬した基礎水理実験を行い、地下水路から地表への噴水現象の発生を確認した。さらに、数値解析モデルによる再

現計算を行い、モデルの適用性と限界、および改良について考察した。

2. 基本的数値解析モデル^{1, 2)}

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。

図-1に示した座標系の下で基礎式を示せば以下のようなある。

[開水路流れの連続式と運動量方程式]

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} = gA \left(\sin \theta - \frac{\tau_b}{\rho g R} \right) + \frac{\partial (-u'^2 A)}{\partial x} \quad (2)$$

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]

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

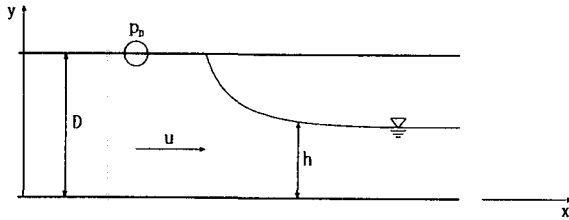


図-1 座標系

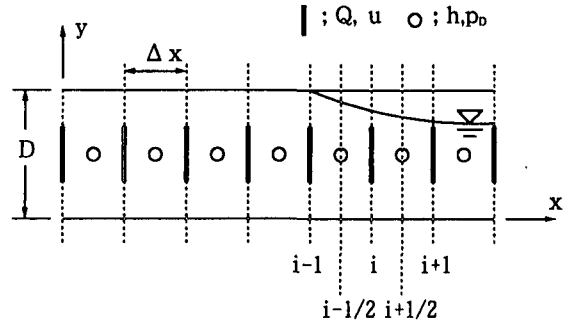


図-2 水理量の定義位置

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

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

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。

図-2 に示した格子分割と水理量の定義位置を用いて、有限体積法に基づいて基礎式を離散化し、数値解析を行う^{1, 2)}。

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³⁾を、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 Harten⁴⁾ の upwind TVD スキームを用いている。

境界面の流量については、図-2 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]

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

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

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

以上の解析法の中で、渦動粘性項は次式で評価した。

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

ここで、 $\alpha = 0.05$ とした。

これまで上記の解析法を用いて、水で満たされた管路への空気泡の侵入現象²⁾、立坑を有する管路系での流量急変時の管路・開水路流れ境界面の移動とサージング⁵⁾の数値解析が行われ、適用性が検証されている。

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高精度の非定常流解析モデルを作成する。さらに基礎水理実験を行い、計算結果と比較することでモデルの適用性を検討する。

水理実験では、マンホールからの急激な噴水現象を再現し、現象を再現するために、地下水路に閉じこめられた空気の影響を考慮する必要性を指摘する。まず、水理実験の概要を説明しよう。

3. 1 対象とする現象

水理実験は2通りの条件の下で行われた。

Run1 は、図-3 (a) に示した実験水路を用いて行われた。まず、上部水槽の中央に取り外し可能な仕切り板を設置し、左側半分を深さ 10cm となるように湛水する。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。

写真-1 に流れの状況を示す。地表流のフロントの進行とともに水槽右半分と連結した立坑から下部管路に水が流入し、管路に流入した水は左右両端から排水される。その後、地表流は水槽右端で反射し、段波が遡上するとともに下部管路が満管状態になる。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た。

Run2 は、図-3 (b) に示した実験水路を用いて行われた。Run1 で用いた実験水路に上部水槽の右側半分の中央に固定

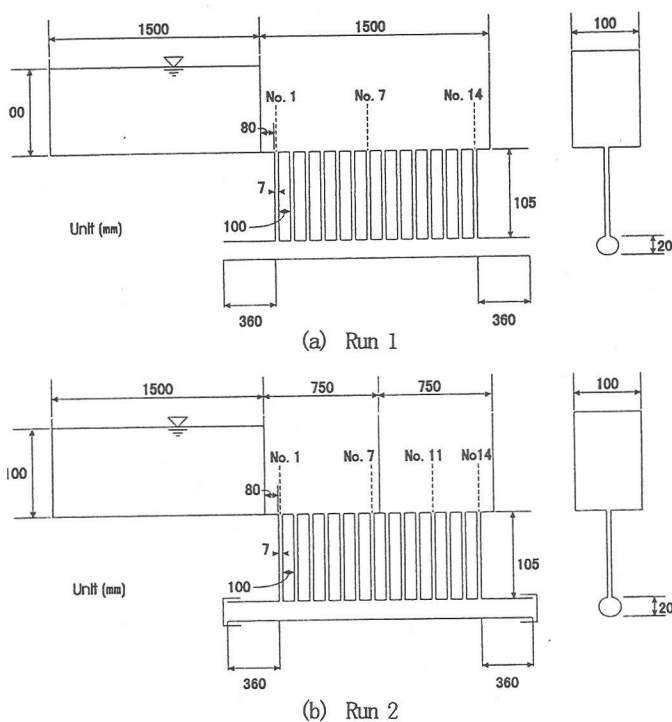


図-3 水理実験に用いられた水路

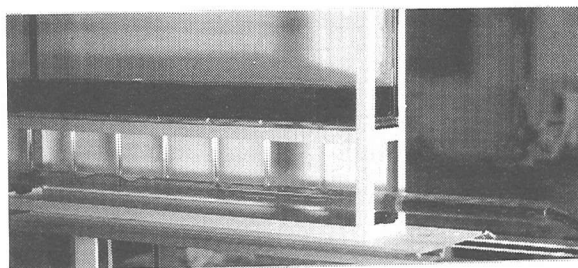
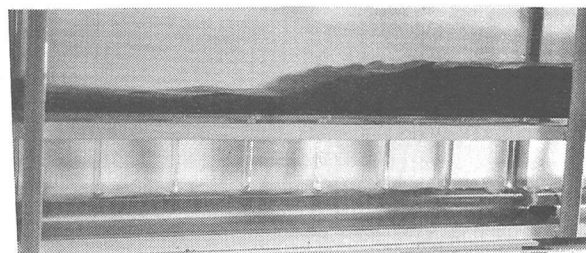
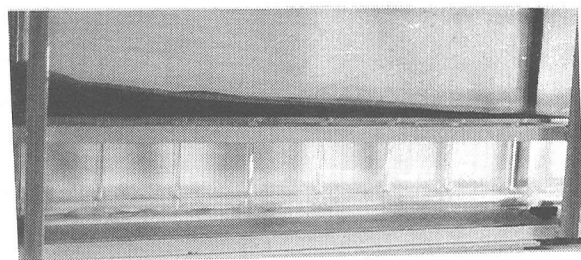


写真-1 地表流の発生と地下水路への流入過程 (Run1)

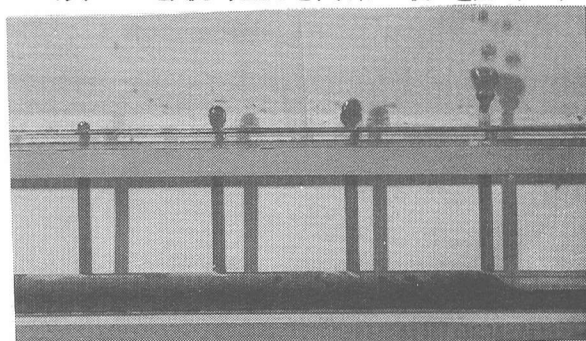


写真-2 地下水路から地表への噴出現象 (Run2)

した仕切り板を設置し、下部管水路の両端を閉じる。Run1と同様に上部水槽の左半分を深さ10cmとなるように湛水し、ダム破壊流れを発生させた。

地表流は固定した仕切り板で反射し、段波が遡上する。下部管水路に流入した水は満管状態の後、仕切り板より右側の立坑を通じて上部水槽に噴出する。その後、地表流は徐々に平衡状態へと達し一定水深となる。写真-2に上部右側に流入水が急激に噴出する様子を示した。最下流の立坑 No. 14 では、下部管水路が満管状態になり立坑を通じて流れが上部水槽へ噴出するとき、管水路右端で空気が閉塞し、10cm以上の噴水が確認された。

Run1 および Run2 ともに、実験水路の図-3 (a) および (b) に示した立坑 No. 1, No. 7, No. 11 および No. 14 の4ヶ所において地表流と地下水路流の様子をビデオおよび写真撮影し、水深の時間変化を計測した。

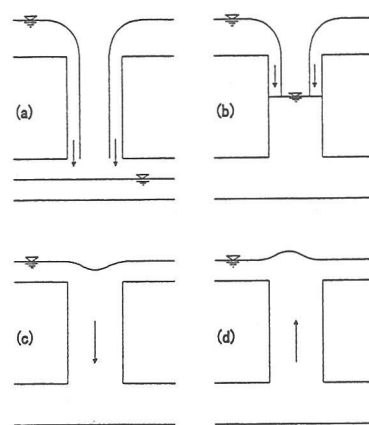


図-4 地表と地下水路間の流出入パターン

3. 2 数値解析モデルによる再現計算

地表流に対しては開水路状態の解析法を、地下水路流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。

立坑を通じた流出入は、立坑近傍の流況パターンを4種類に分類する。図-4 (a), (b) の場合には地表流の水深から決

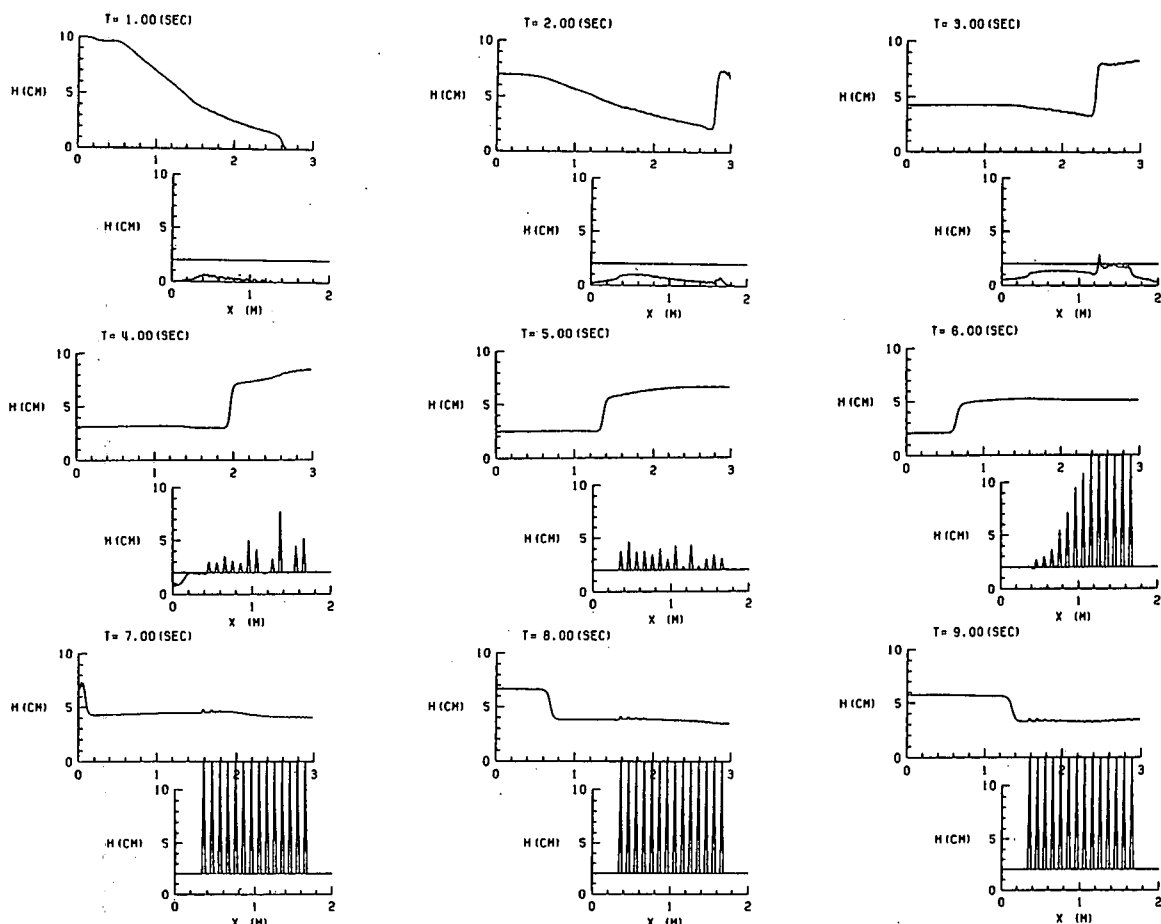


図-5 水面形の時間変化 (Run1, $a=0.05$)

まる流量が下部に流入する。この場合の流入流量は、円孔の辺に沿う単位幅流量を周辺の地表流水深 h_u を用いて $h_u \sqrt{gh_u}$ で評価した次式で計算する。

$$q = a(2\pi \frac{D}{2}) \sqrt{gh_u} h_u \quad (8)$$

ここに、 h_u : 地表流の水深、 D : 立坑の管径、を表す。 a は定数であり、地表流の水深-時間曲線の計算結果が実験結果に適合するように、試行錯誤的に 0.05 とした。

図-4 (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決められる。この際、立坑部の圧力水頭は管路径、立坑高さおよび地表流の水深の和として管水路の流量を計算している。

3. 3 計算結果の考察

図-5 に、Run1 について流入パラメータを $a = 0.05$ とした場合の水面形の時間変化を示す。

図-5 中の時間は、仕切り板急開後の時間を表す。各時間の図の内、上は地表流の、下は地表と対応する地下水路内

水深の x -方向分布を示している。地下水路の水深が地表流水深図の横軸に達している状態は、地表流と地下水路流が一体となった状態である。

地表流のフロントが右側に進行するとともに立坑から下部管水路に水が流入し、その後、地表流は右端で反射し、段波が遡上している。段波の遡上と同時に下部管水路の水深が急増するとともに立坑水位が上昇し、地表流と地下水路流が一体となっていく様子が再現されている。

図-6 は、立坑 No. 11 および No. 14 の位置における、地表流と地下水路流の仕切り板急開後の水深の時間変化について、計算結果と実験結果を比較した図である。地下水路の水深の計算結果が実験結果に十分には適合していないが、計算結果は概ね現象を再現していることがわかる。地下水路水深の時間変化において、4 (sec) 近傍でピークが生じているのは、地下水路内で一旦開水路から管路流れの状態に移移した後、その位置の近くの状態が開水路流れの状態に移移するなどの、管路内の複雑な流れの状態に対応していると思われる。

(実験結果が 3 (sec) まではしか示されていないのは、細い立坑内の急激な水位変化が読みとれなかったためである。)

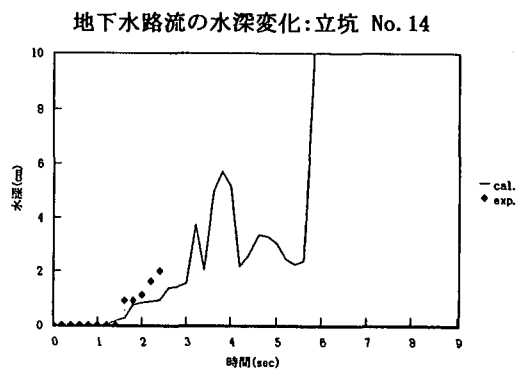
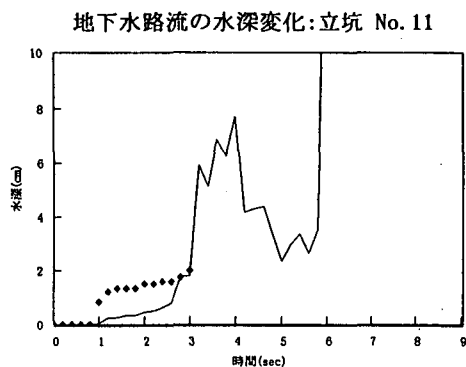
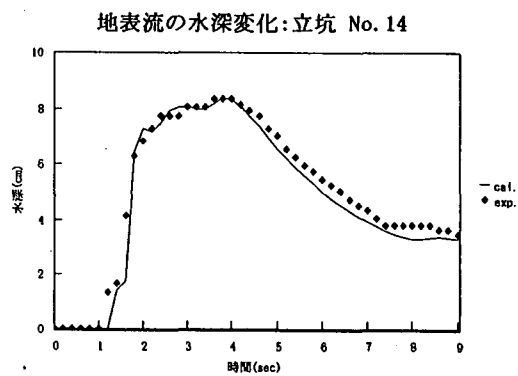
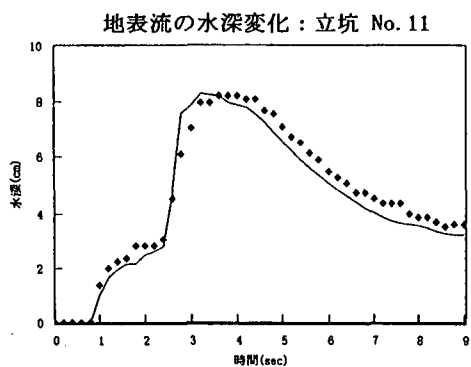


図-6 水深の時間変化に関する実験結果と計算結果の比較 (Run1, $a=0.05$)

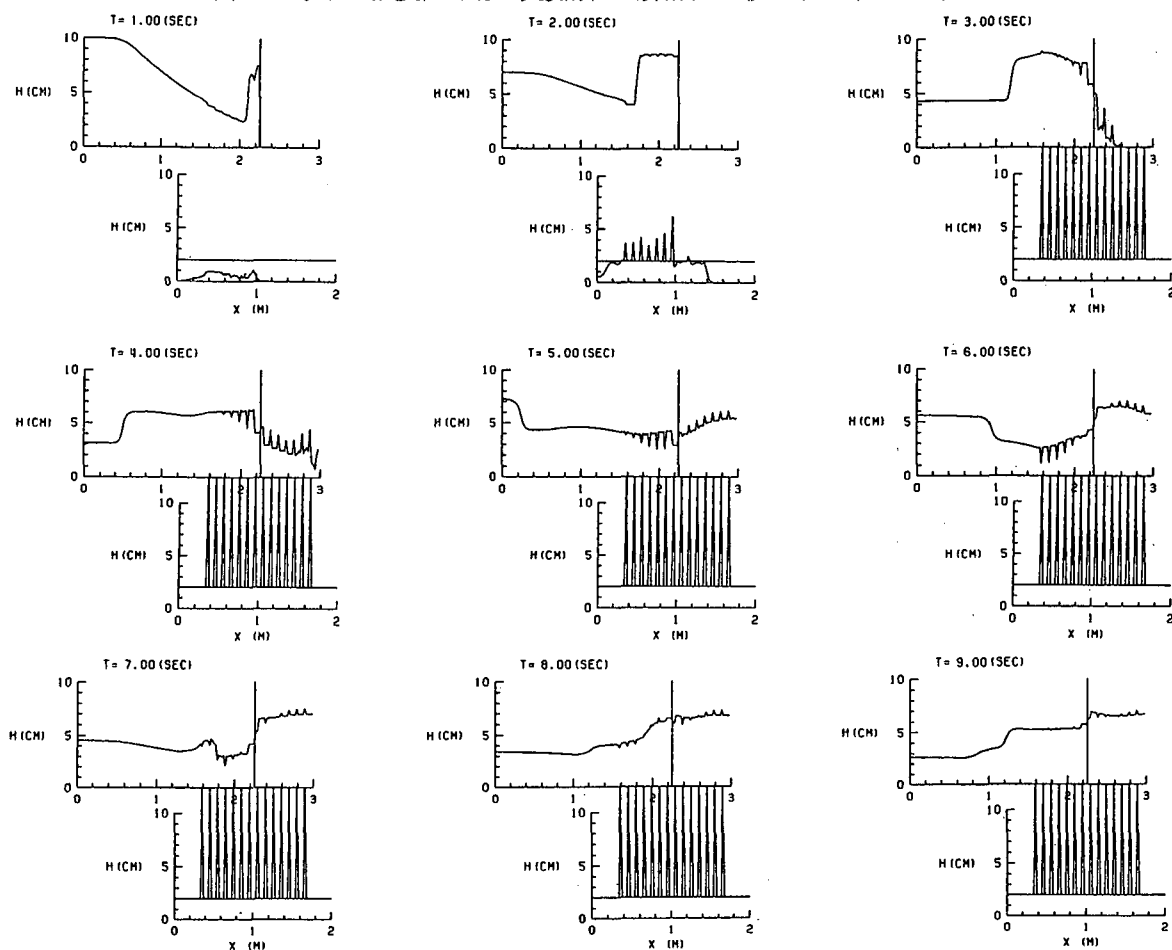


図-7 水面形の時間変化 (Run 2, $a=0.05$)

図-7 に、Run2 について $a = 0.05$ とした場合の水面形の時間変化を示す。地表流は固定した仕切り板で反射し、段波が遡上している。それと同時に立坑を通じて下部管路の水深が増加する。時間とともに右側の水深が増加し、仕切り板より右側の上部水槽へ噴出する。さらに噴出を続け、上部右側水深が左側水深より大きくなっている。その後、上部水槽では仕切り板を挟む左右でサージングが発生するが、このような現象は実験では生じなかった。このような計算結果が得られた原因として、計算では、流れが立坑を通じて上部から下部、下部から上部へと移動する際のエネルギーの形状損失が考慮されていないことが考えられ、次に形状損失の効果を考慮して計算を行った。

図-8 に、 $a = 0.05$ 、形状損失係数 $K_b = 1.5$ とした場合の計算による水面形の時間変化を示す。(分合流部の形状損失係数は、条件により 0.1 から 10 のオーダーまで大きく変化する。本研究では、流れ全体の再現性の観点から、試行錯誤的に $K_b = 1.5$ とした。) これを見ると、上部水槽の仕切り板より右側での水深の急激な上昇は抑制され、時間の経過とともに実験結果と同様、徐々に増加している。

図-9 に、立坑 No. 11 および No. 14 における地表流と地下水路流の水深の時間変化について、計算結果と実験結果の比較を示す。立坑 No. 11、No. 14 は仕切り板より右側に位置し、地下水路流については計算結果と実験結果はほぼ適合している。しかし、地表流については、立坑 No. 11 の計算結果と実験結果は適合しているが、立坑 No. 14 の実験結果に見られる瞬間的な激しい噴水現象が再現されていない。これは、写真-2 に見られる管路右端で閉塞された空気が圧縮され、空気が上昇することを考慮していないことが原因と考えられる。そこで次に、管路内に閉じこめられた圧縮空気の影響を考慮することでモデルの改良を行う。

4. 管路内に閉じ込められた圧縮空気の影響を考慮したモデルの改良

閉じこめられた圧縮空気の圧力変化を図-10 に示したように、ボイルの法則を用いて評価することを考える。

$$p_a V_a^\gamma = p_0 V_0^\gamma, \quad p_a = p_0 + \Delta p_a \quad (9-a)$$

$$\Delta p_a = p_0 \left(\left(\frac{V_0}{V_a} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (9-b)$$

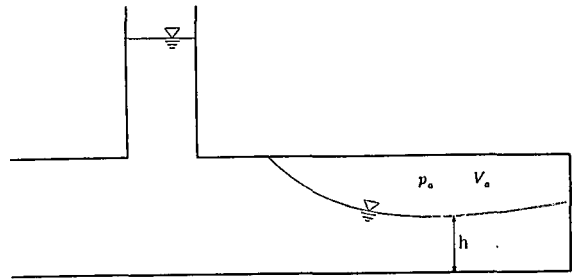


図-10 閉塞空気の圧力変化を考慮するモデルの説明図

ここに、 p_0 : 大気圧、 p_a : 圧縮空気の圧力、 V_0 : 大気圧時の空気の体積、 V_a : 圧縮空気の体積、 Δp_a : 大気圧からの圧力変化を表す。また、 γ は定数である。

開水路流れの一次元運動量式(2)を導く過程において、水面の空気圧の大気圧からの偏差を考慮すると、式(2)右辺に式(10)で表される項が追加される。

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Delta p_a}{\rho} A \right) + \frac{\Delta p_a}{\rho} B_s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (B_s \text{ は水面幅}) \quad (10)$$

この付加項を考慮して、Run2 で $a = 0.05$ 、 $K_b = 1.5$ とし、 $\gamma = 1.7, 1.75, 1.8$ として計算を試みたところ、 $\gamma = 1.7$ では立坑 No. 14 での噴水現象が再現されず、1.8 では安定した計算結果が得られなかった。そこで図-11 に 1.75 としたときの水面形の時間変化を示した。2.6(sec)と2.8(sec)の図を見ると、管路右端で空気が閉塞、圧縮され、立坑 No. 14 から瞬間的に噴水が発生していることがわかる。

図-12 に、立坑 No. 11 および No. 14 における地表流と地下水路流の水深の時間変化について、計算結果と実験結果の比較を示す。

立坑 No. 11 については、地表流および地下水路流ともに計算結果と実験結果はほぼ適合している。立坑 No. 14 の計算結果については、地下水路流の水深が急激に上昇し、上部水槽へと達する。噴水は実験に比べて早く発生し、短時間で終了している。その後地表流の水深は徐々に上昇していく。

計算結果と実験結果の適合性は充分ではないが、圧縮空気の影響を考慮しない場合よりかなり改善され、少なくとも現象を定性的に再現できることが確認された。しかし、上部水槽は、幅 10cm、立坑の管径は 7mm であり、噴水は水路横断方向に対して非常に局所的な現象である一方、本研究では地表流に対して 1 次元開水路非定常流モデルを適用しているため、現象の再現には限界があると考えられる。今後、地表流に対して 2 次元モデルを適用し、更に精度の高いモデルへ改良していく必要がある。

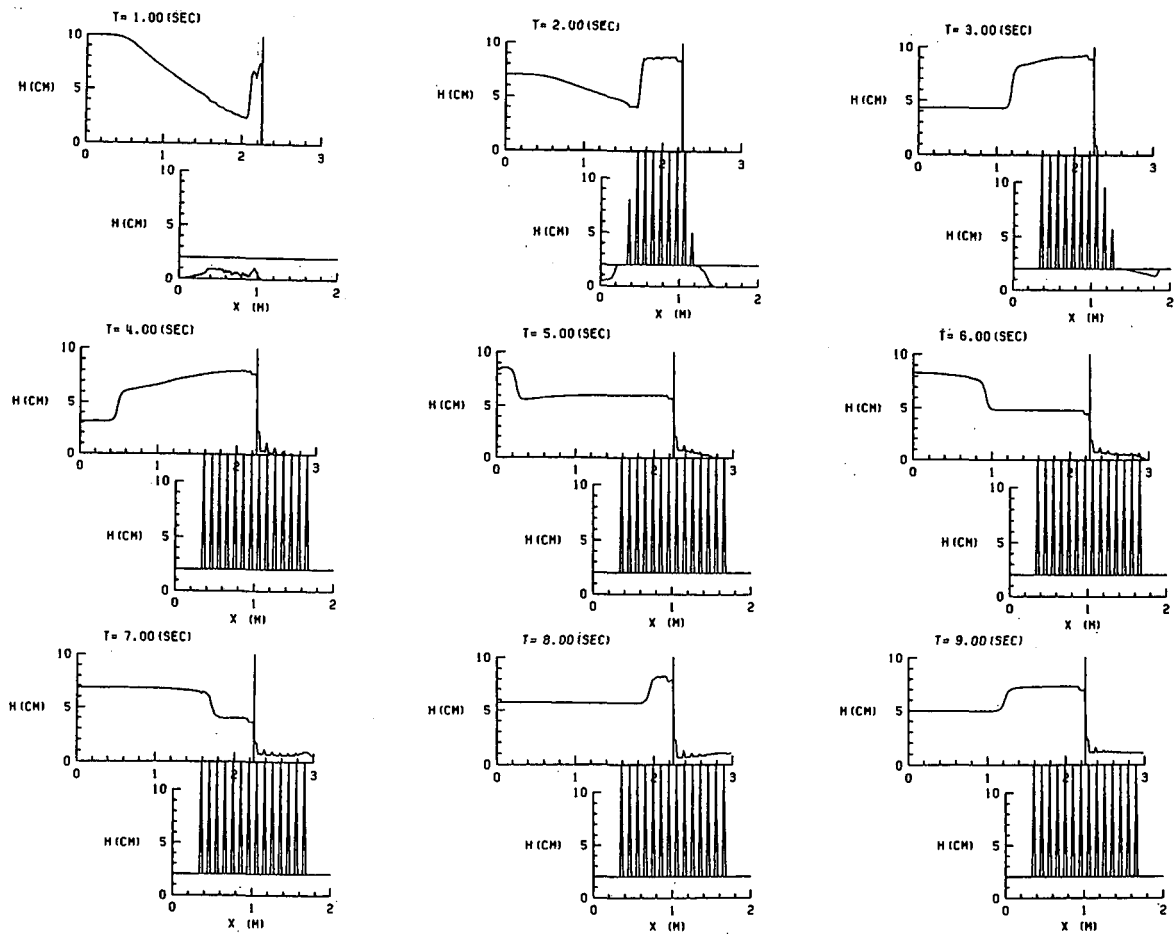


図-8 エネルギーの形状損失を考慮した場合の水面形の時間変化 (Run 2, $\alpha=0.05$, $Kb=1.5$)

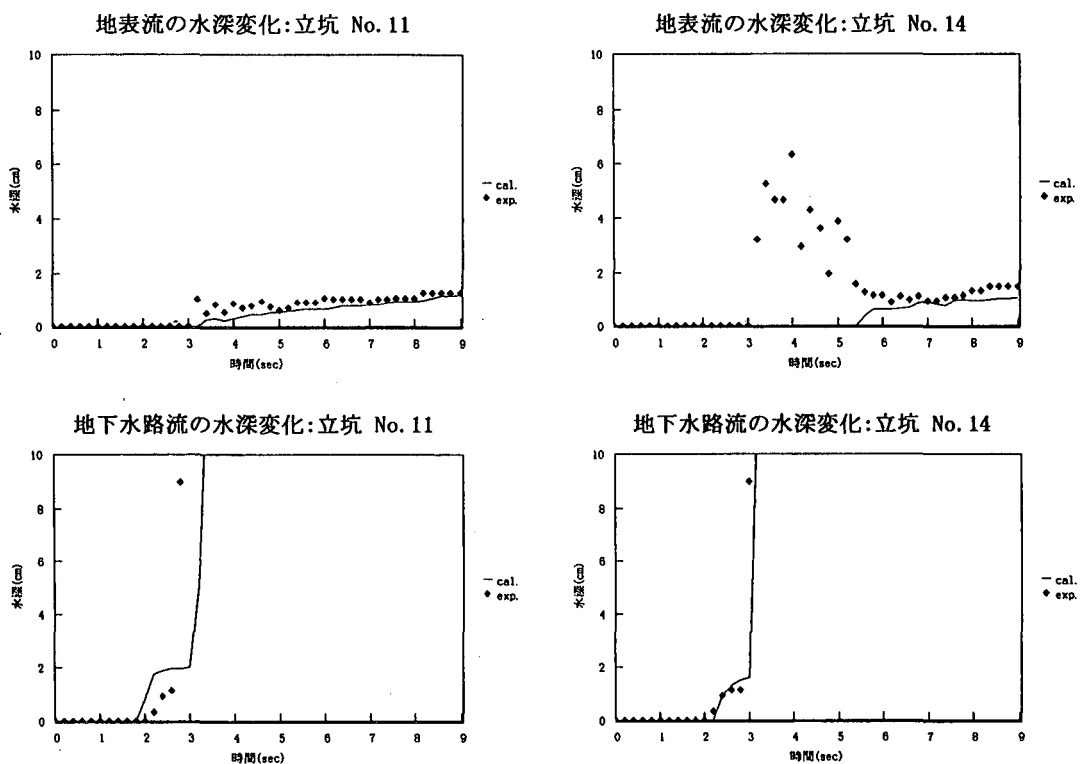


図-9 エネルギーの形状損失を考慮した場合の水深の時間変化 (Run 2, $\alpha=0.05$, $Kb=1.5$)

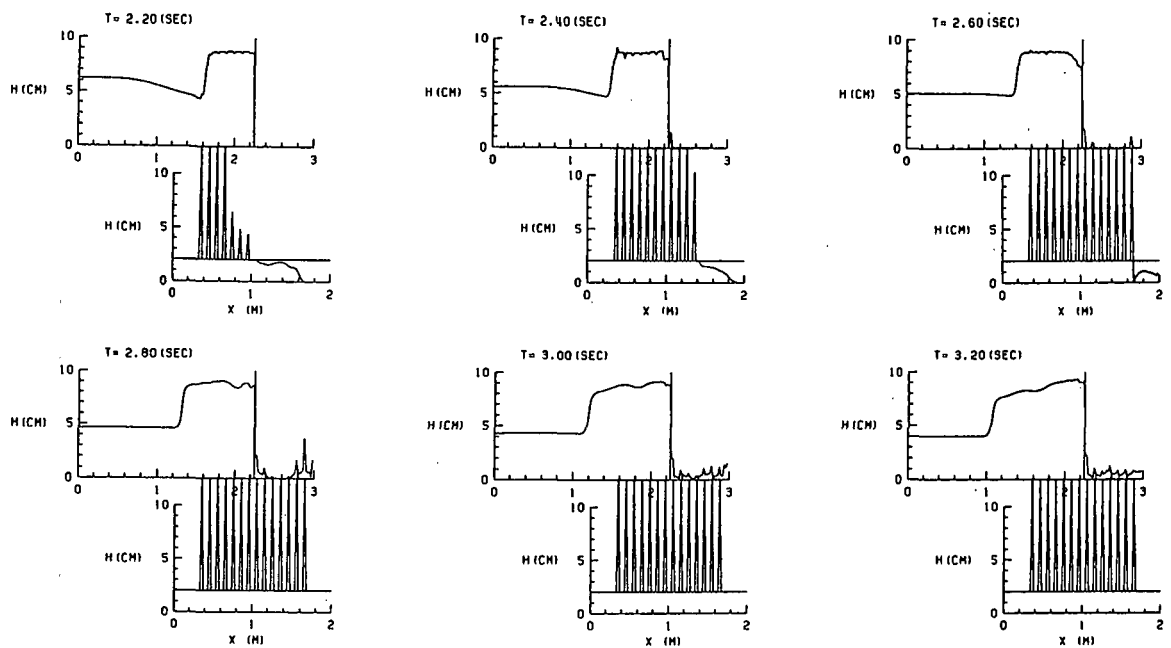


図-1 1 空気圧変化を考慮した場合の水面形の時間変化 (Run 2, $a=0.05$, $Kb=1.5$, $\gamma=1.75$)

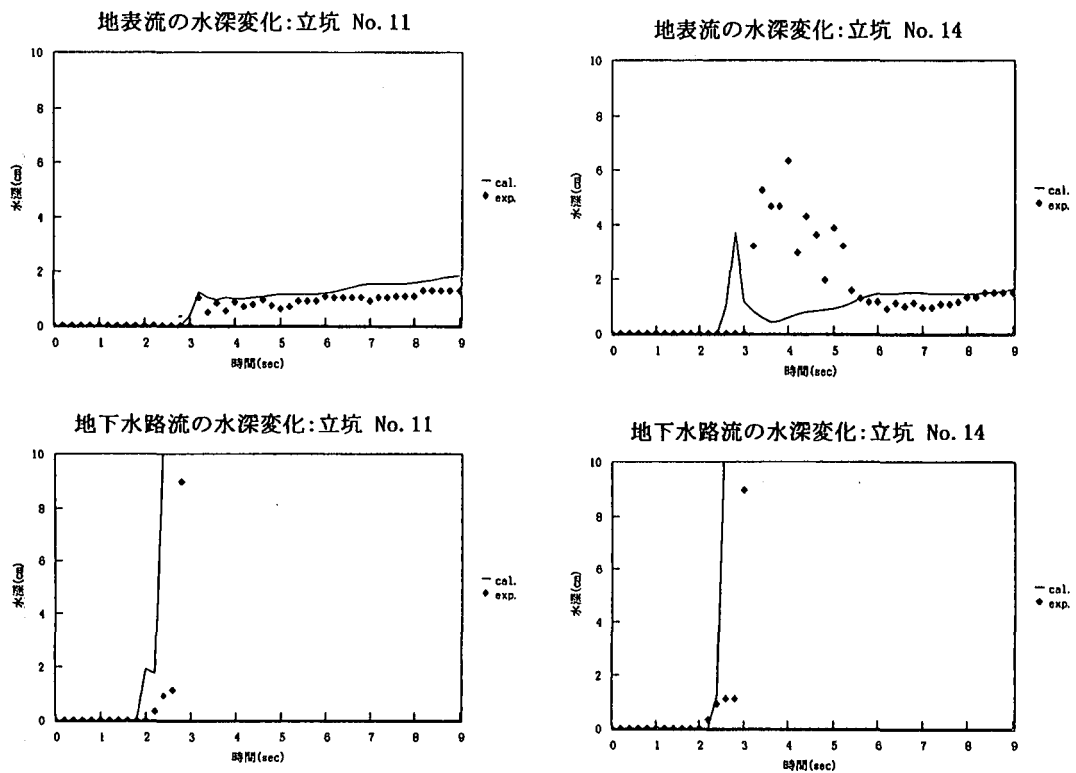


図-1 2 空気圧変化を考慮した場合の水深の時間変化 (Run 2, $a=0.05$, $Kb=1.5$, $\gamma=1.75$)

5. おわりに

本研究は、豪雨時に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ようになる。

- (1) 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、地下水路から地表への噴水現象を再現した。
- (2) 基本的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するとともに、数値解析により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。
- (3) さらに、地下水路から地表への噴水現象を再現するために、地下水路に閉じこめられた空気の流れ変化をできるだけ簡単に数値解析に考慮する方法を示し、概ね噴水現象が再現されることを確認した。

今後、数値解析モデルを実流域へ適用し、モデルの実用性を高めてゆく必要がある。

参考文献

- 1) 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.593-602, 1993.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Harten, A. : High resolution schemes for hyperbolic conservation laws, J. Computational Physics, Vol.49, pp.357-393, 1983.
- 5) 多田彰秀・細田 尚・井上和也: 地下水路系のサージングに関する二、三の検討, 水工学論文集 第39巻, pp.385-390, 1995.

(1998年4月24日受付)