

地下水路系で生じる過渡水理現象の解析法とその応用に関する研究

細田 尚*・多田彰秀**・岩田通明***・村本嘉雄*・古八健夫*

*京都大学大学院工学研究科

**西松建設(株)技術研究所

*** (株)技術研究所

要 旨

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予測するための数値解析モデルについて考察したものである。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る。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。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、地表流と地下水路系の相互作用を考慮した数値解析モデルを開発した。

キーワード：地下河川、下水道網、開水路流れ、管路流れ、数値解析

1. はじめに

近年、河川流域の著しい都市化に伴い、豪雨時大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、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。これは、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り、たとえば、近畿地方では、京都市内を流れる白川や大津市内小河川流域で地下放水路が建設中であり、また神戸市内の高羽川では二層河川が計画されている。

このような地下河川や地下水路系において考えられる水理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、次のような水理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遷移するため、開水路流れと管路流れが共存する非定常流の予測法の確立が重要となる。

② ポンプ稼働時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、圧力変動中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（渠城・木内・田中, 1994 ; 戸田ら, 1996）。

一方、中小河川流域の地下河川の場合、自然流下開水路方式となる場合が多く、源流域から排水域が近距離にあるため水

路勾配が急になり、流れは一般に高速流となる。このため、水路湾曲部や屈曲部のような形状急変部において衝撃波の発生など激しい流れが生じ、その対策を事前にご講じておく必要がある。また、排水域の水位によっては満管状態と開水路状態が共存する複雑な流れになるため、流れの状況を予測しておく必要がある。

上述のように、地下河川に関わる水理的課題に対処するには、管路状態と開水路状態の共存する複雑な非定常流を予測する数値解析モデルを開発し検証する必要がある。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へ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。また、実際の地下河川のスケールと洪水流入ノイドログラフを用いて初期湛水過程のシミュレーションを行い、生じる過渡水理現象について考察した。

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高精度の非定常流解析モデルを開発した。

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、管路流と開水路流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。さらに、実際規模のモデル地下河川を設定し、流入条件が変化したときに過渡水理現象がどのように変化するかを、数値解析モデルを用いて考察する。

2. 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。水路を空の状態とし、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。流入水のフロントが浸入する過程、およびフロント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、

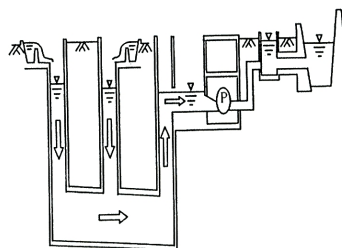


Fig. 1 Schematic illustration of a typical underground floodway in the megalopolis

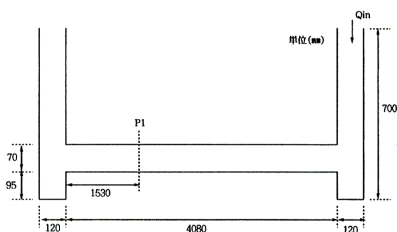


Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup

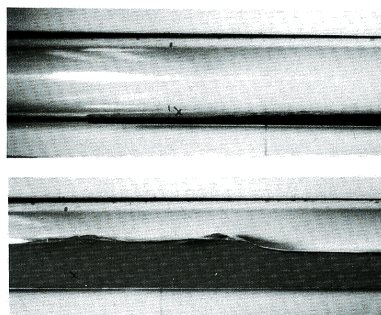


Photo 1 Invasion process of water front and the propagation of hydraulic bore

左右端の立坑水位が上昇していく。

2. 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基礎式を示せば式(1)以下のようである。

[開水路流れの連続式と運動量方程式]

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

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

ここに、 Q : 流量、 u : 断面平均流速、 A : 流水断面積、
 R : 径深、 u^2 : 断面平均乱れ強さ、 τ_b : 壁面せん断応力、
 θ : 水路床角度、 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]

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_D}{\rho g} + D \cos \theta \right) = gA(\sin \theta - \frac{\tau_b}{\rho g R}) + \frac{\partial -u^2 A}{\partial x} \quad (4)$$

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ン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、有限体積法に基づいて基礎式を離散化し、数値解析を行う (多田・細田ほか, 1994)。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 (Hirt・Cook, 1972) を、開水路状態は式 (1)、(2) を用い、洪水氾濫水の解析法を適用する。運動量方程式の離散化には Harten (1983) 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]

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

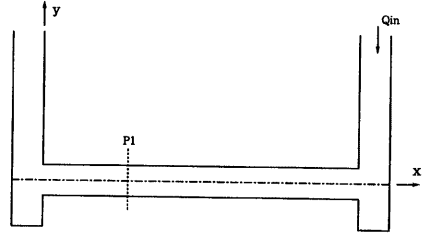


Fig. 3 Coordinate system

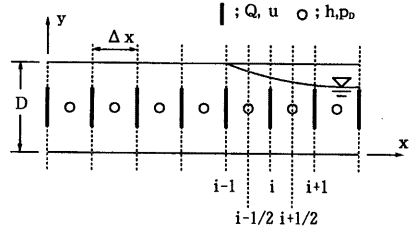


Fig. 4 Arrangement of hydraulic variables

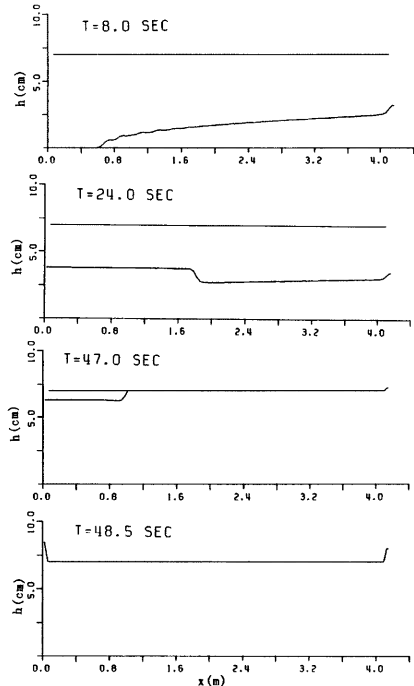


Fig. 5 Calculated results of depth distributions in the circular conduit

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

以上の解析法の中で、満管状態を次の式で評価した

$$\frac{\partial(-u^2 A)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (AD_h \frac{du}{dx}), \quad D_h = ah|u| \quad (7)$$

ここで、 $\alpha = 0.05$ とした

2. 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プロントが侵入する過程、およびプロント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。両者おまほは適合している。

2. 4 実スケールでの現象の定性的考察

数値解析モデルを実際の地下河川のスケールに近いモデル地下河川に適用し、2通りの流入ノイドロググラフを用いて初期湛水過程の再現計算を行った。

Fig. 7にモデル地下河川の概要を、Fig. 8に流入ノイドロググラフを示した。計算に用いたノイドロググラフの最大流量と継続時間をTable 1に示した。

矩形ノイドロググラフの計算結果をFig. 9(a), (b), (c)に示した。Fig. 9(a)は流入継続時間が短いRun A-1であり、流入洪水の体積が小さいので開水路流れの状態のみ生じ、段波が左右に移動している。Fig. 9(b)はRun A-1より継続時間が少し長いRun A-2であり、管路状態と開水路状態の境界面が波となって左右に移動する現象がみられる。Fig. 9(c)は継続時間が長い場合Run A-3であり、満管になった後、流入立坑と排水立坑の間でサージが生じている。このように、数値解析結果から、地下河川の初期湛水過程において上述の3パターンの過渡現象が生じると考えられる。その中で、立坑間でサージが生じる場合には、地下河川の設計に先だって、立坑の最大水位と水位の上昇速度を事前に評価しておくことが必要と考えられる。

Table 1に示した三角形ノイドロググラフの場合のRun B-1~B-3についても、矩形ノイドロググラフの場合と対応する結果が得られた。

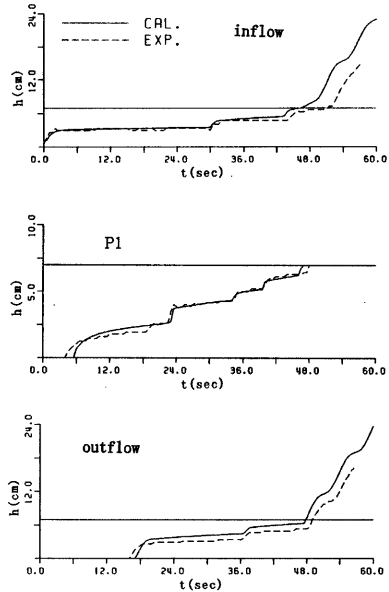


Fig. 6 Temporal depth variations at the inflow and outflow vertical shafts and P1

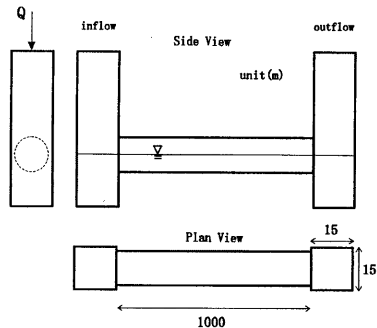


Fig. 7 Schematic illustration of the model channel for the numerical simulation

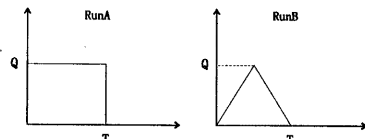


Fig. 8 Patterns of the inflow hydro-graphs

Table 1 Hydraulic variables for the calculations simulating the hydraulic transients in the model underground channel

	Q (m ³ /s)	T (sec)	Pattern
RunA-1	120	500	A
RunA-2	120	700	A
RunA-3	120	750	A
RunB-1	200	600	B
RunB-2	200	830	B
RunB-3	200	900	B

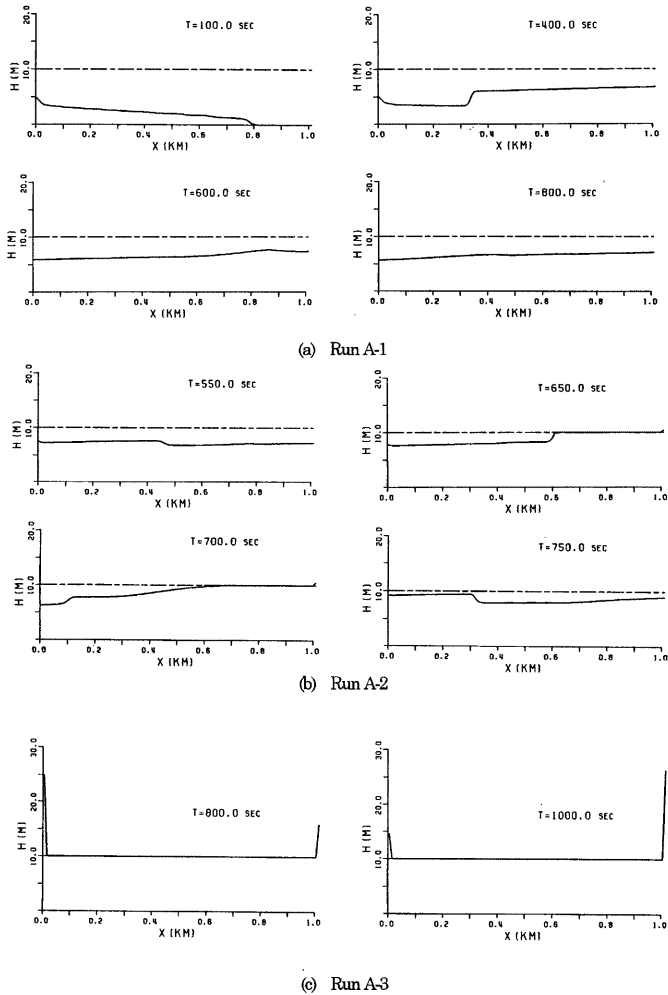


Fig. 9 Calculated results of test simulation to investigate the hydraulic transients in the underground channel

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。

3. 1 対象とする現象

Fig. 10 に示した実験装置を考え、上部水槽の左側半分は灌水する。さらに、仕切り板を瞬間的に引き上げることでもダム破壊流れを発生させ、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。

このような実験を行い現象を確認するとともに、数値解析モデルを用いて流れの再現を試みる。

Photo 2 に流れの状況を示した。Photo 2 (a) は水路中央付近、(b) は下流端付近の流れである。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。

3. 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入で相互作用するように数値解析モデルを改良した。

流入の流量は、立坑近傍の流れを Fig. 11 のように分類し、Fig. 11 (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. 11 (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入流量は立坑を挟み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）は管路径、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。

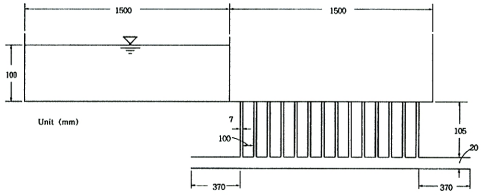
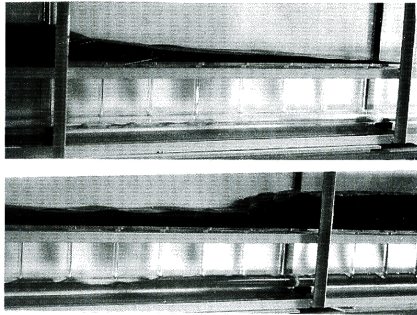
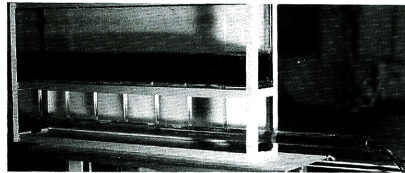


Fig. 10 Experimental setup for the unsteady flow with the interaction between the surface flows and the underground channel flows



(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

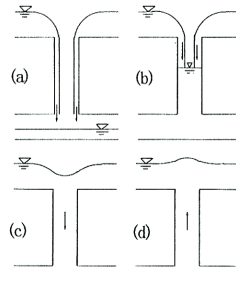


Fig. 11 Classification of the flow pattern at the vertical shafts

3. 3 計算結果の考察

Fig. 12 に、湛水深を 10 cm とした場合の仕切り板急開後の水深分布を示した。上部水槽での流れは右側に侵入するとともに、立坑から下部管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路の水深も急増し、立坑が水で満たされ下部と上部流れ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は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。今後、より定量的な検証を行う必要がある。

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) さらに、実際の地下河川のスケールと洪水流入ハイドログラフを用いて計算を行い、生じる現象を定性的に分類した。とくに、流入流量が多く流入と排水の立坑間でサージングが生じる場合、立坑最大水位と立坑水位上昇速度の事前評価が重要であることを指摘した。
- (3) 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。
- (4) また、数値解析モデルを改良し、地表流と地下水路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、地表流と地下水路の相互作用を考慮した数値解析モデルの実流域への適用を試みたい。

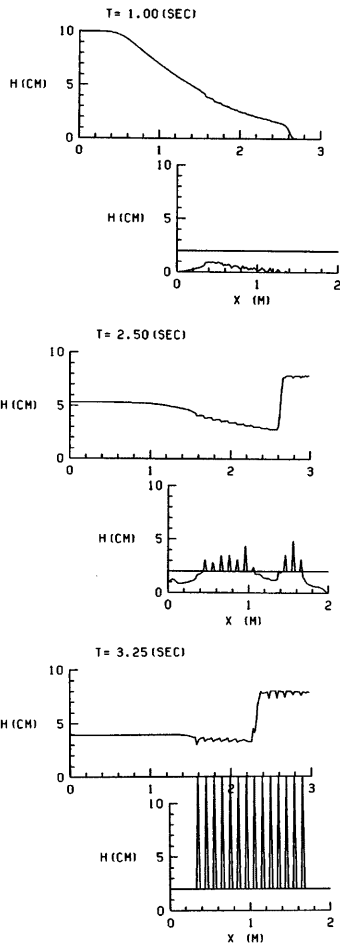


Fig.12 Calculated results of the depth distributions in the upper and lower channel

参考文献

- 栗城 稔・木内 豪・田中義人 (1994) : 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.
- 栗城 稔・木内 豪・田中義人 (1994) : 首都圏外郭放水路における複断面型流入立坑の水理設計, 土木技術資料 36-8, pp.48-53.
- Hirt, C.W. and J.L. Cook (1972) : Calculating three-

dimensional flows around structures and over rough terrain, J. Computational Physics, Vol.10, pp.324-340.
Harten, A. (1983) : High resolution schemes for hyperbolic conservation laws, J. Computational Physics, Vol.49, pp.357-393.
戸田圭一・井上和也・大本雄二・府川 新 (1996) : 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.
多田彰秀・細田 尚・井上和也・北原政宏 (1994) : 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.

Numerical Analysis of Hydraulic Transients Induced by the Inflow Discharge into the Underground Channel

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

* Graduate School of Engineering, Kyoto University
** Nishimatsu Construction Co., Ltd.
*** CTI Engineering Co., Ltd.

Synopsis

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 the 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 pipe flow can be reproduced by using the numerical model. Numerical model is extended to predict the interaction between the overland surface flow and the flow in the underground channel., considering the discharge through the manholes.

Keywords: open channel flows, pipe flows, numerical analysis, flood disaster, sewer network