

地下水路系のサージングに関する二、三の検討
Surging Phenomena with Partially Free Surface Unsteady Flows
in a Circular Conduit

○多田 彰秀¹⁾・細田 尚²⁾・井上 和也³⁾

By Akihide TADA, Takashi HOSODA and Kazuya INOUE

This paper deals with the surging phenomena with the propagation of multiple interfaces between open channel free surface flows and pressurized pipe flows, which can be seen due to the rapid change of flow discharge in the sewer network system, the tailrace tunnel of hydropower plants, etc. The circular pipe with multiple vertical shafts is used as the experimental set-up to investigate the fundamental characteristics of phenomena. The temporal and spatial variations of the pressure and depth in the pipe after the instantaneous interception of discharge are measured under some hydraulic conditions. It is tried to reproduce the phenomena numerically by means of the simulation model proposed by authors. The numerical results are compared with the laboratory tests to make sure the applicability of the model.

Keywords: unsteady flow, surging, underground floodway, numerical analysis

1. はじめに

下水道・地下放水路網などの地下水路における水理過渡現象の特徴として、水路内の流量が急増・急減した場合、流れの状態が自由表面を有する開水路流れの状態から自由表面が水路天端に着水した満管状態（管路流れの状態）に、あるいは逆に管路流れから開水路流れに移移することが考えられる。すなわち、負荷の急遮断に伴って流量が急変すると、立坑水位も急激に減少し、さらに地下水路天端より低くなると、開水路流れと管路流れが共存する状態が現れる

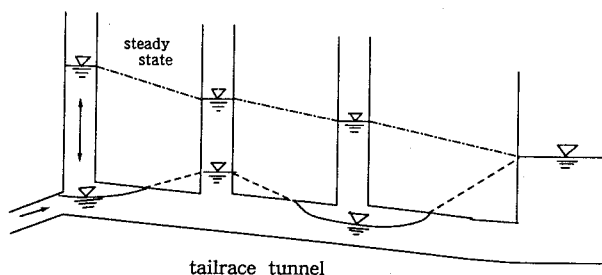


図-1 管路・開水路流れ境界面の生じるサージング現象

(図-1参照)。本研究は、このような地下水路系の過渡水理現象に対して、平面2次元流れ場を対象に提案された管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非定常流解析法¹⁾を適用し、サージング現象の再現を試みるとともに、実験結果と比較することにより数値解析法の有効性と問題点を明らかにする。

-
- 1) 正会員 工修 西松建設主任研究員 技術研究所
(〒242 大和市下鶴間2570-4)
2) 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室
3) 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

2. 水理実験の概要

まず、現象の把握と数値解析モデルの検証を目的として行われた水理実験の概要を説明する。実験は、西松建設技術研究所において図-2に示す管路系を用いて行われた。本研究では、図-2の上流と下流二つの立坑を塞ぎ、管路中央に立坑が一つ存在する状態で、上流水槽直下流の手動バルブを急閉することにより流れを遮断し、図-3に示した位置に設置された圧力変換器によって遮断後の水圧を計測した。また、管路中央の立坑水位の変動、空気泡の浸入と管路・開水路流れ境界面が左右に伝播する様子、その後揺れ戻しにより再び立坑水位が急上昇する様子をビデオと写真撮影した。

実験の水理諸量を表-1に示す。Run-1の流量遮断後の境界面の伝播過程を示した図-4を見ると、手動バルブを急閉した直後、立坑-Bにおいて急激な水位の降下が生じる。これに伴って空気泡が立坑より満水管路へ浸入し、管路・開水路流れ境界面が上・下流へと伝播して行く。その後、下流側に伝播した境界面は揺れ戻しにより上流に伝播し、立坑-Bの位置で空気泡を含んだ水塊が吹き上げられ、空気が立坑-Bより上流側の管内に閉じ込められる。

図-5(a)～(c)には、この一連の過程の間に計測された圧力と時間の関係を示した。図-5(a)、(b)、(c)はそれぞれ立坑上流側、立坑位置、下流側の時系列である。図-5(a)を見ると、流量遮断直後に水撃波と考えられる圧力の激しい振動が見られる。図-5(b)、(c)を見ると、立坑位置から下流では水撃波の影響が見られないことがわかる。水撃波は速やかに減衰し、その後立坑付近で境界面の伝播を伴うサージングが生じている。

3. 数値解析モデルによる現象の再現

これまでに考察してきた現象に対し、管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非圧縮性流れとしての非定常流解析法^{1,2)}を適用し、現象を数値解析的に再現することを試みる。以下に数値解析に用いられた基礎式および解析法の概要を簡単に示す。

3.1 基礎式

基礎式は、開水路流れと管路流れの連続式および運動方程式で構成され、図-6に示した座標系を参照して次のように書き表される。

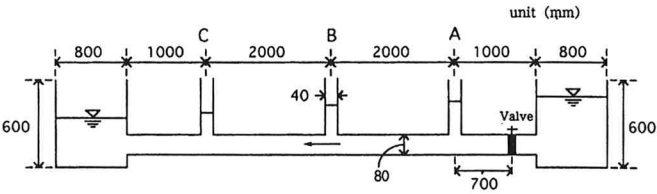


図-2 実験装置の概要

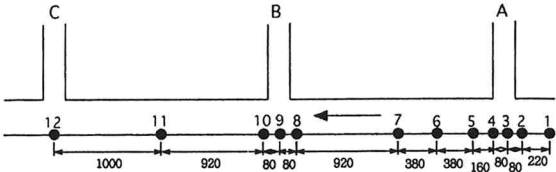


図-3 圧力変換器の位置

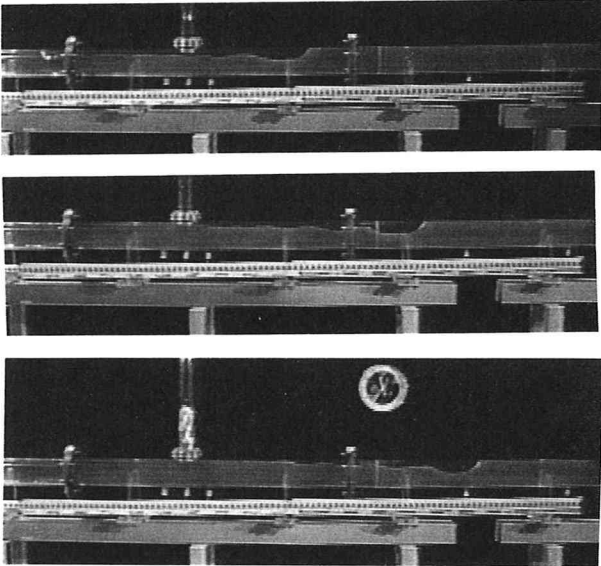


図-4 流量遮断後の流れ

表-1 実験の水理諸量

	下流端水深 $H_0(\text{cm})$	流量 $Q_0(\text{l/s})$	遮断時間 (sec)	レイノルズ数	立坑
Run 1	13.5	1.78	0.6	28800	B
Run 2	12.0	3.37	0.61	47600	B

H_0 は管路床からの水深

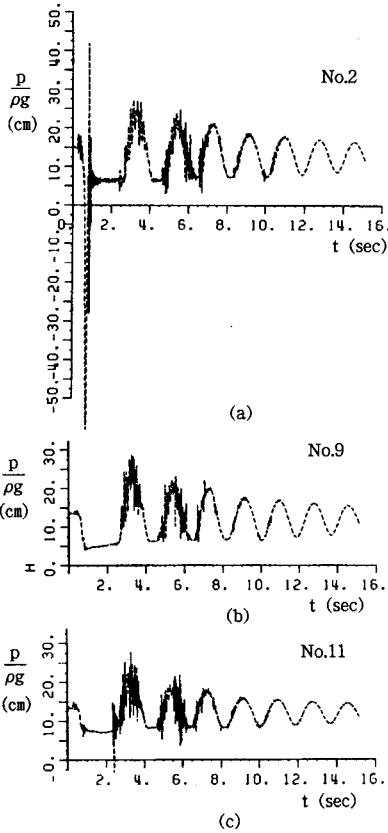


図-5 圧力と時間の関係 (Run-1, 実験結果)

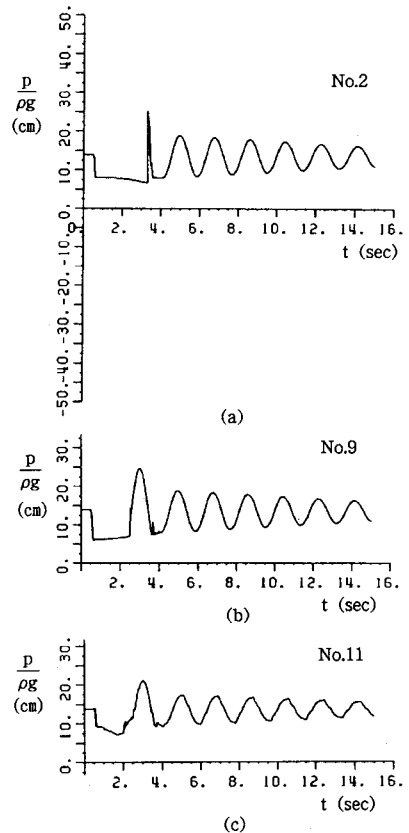


図-8 圧力と時間の関係 (Run-1, 計算結果)

(開水路流れ)

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

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

(管路流れ)

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial uQ}{\partial x} + gA \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_D}{\rho g} + D \cos \theta \right) = gA \left(\sin \theta - \frac{\tau_{bx}}{\rho g R} \right) + \frac{\partial (-u'^2 A)}{\partial x} \quad (4)$$

ここに、 x : 空間座標、 t : 時間、 A : 断面積、 Q : 流量、 h : 水深、 R : 径深、 τ_{bx} : 壁面に作用するせん断応力ベクトルの成分 (本研究ではManning則で評価し、 $n=0.01$ とした)、 u : x 方向の断面平均流速、 u' : x 方向の乱れ速度、 p_D : 管路状態の天端 ($y=D$) の圧力、 ρ : 水の密度、 θ : 水路床勾配。本研究では $\theta=0$ なので、 $\cos \theta=1$, $\sin \theta=0$ である。

3.2 数値解析の手順

数値解析法として有限体積法を用いる。図-7に格子分割および水理量の定義位置を示した。流れを管路状態、開水路状態および両者の境界面の三領域に分類し、各領域に対応した基礎式と解析法を用いて計算を行う。

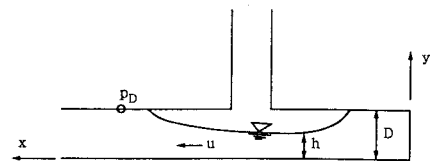


図-6 座標系

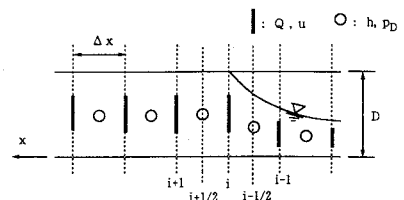


図-7 変数の配置

開水路流れに対しては洪水氾濫水の解析法を、管路流れには圧力の収束計算を伴う非圧縮性流体の非定常解析法を適用する。いずれの場合も基礎式中慣性項の離散化には、段波、跳水などの流れの不連続部で数値振動を生じないTVD法のうち、Hartenの提案するスキーム³⁾を用いる。

管路と開水路流れの境界面の流量は、図-7を参照して(2)式と(4)式を境界面近傍で積分して得られる次式を離散化した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} \Delta x + (uQ)_{x_{i+1/2}} - (uQ)_{x_{i-1/2}} + g A_{x_i} \{ h_{i+1/2} - (\frac{p_D}{\rho g} + D)_{i-1/2} \} \\ = -g A_{x_i} \Delta x (\frac{\tau_{bx}}{\rho g R})_{x_i} + (-\overline{u'^2} A)_{x_{i+1/2}} - (-\overline{u'^2} A)_{x_{i-1/2}} \end{aligned} \quad (5)$$

上記の解析法の中で、乱れ速度による運動量輸送項は簡単のため渦動粘性係数を用いて次式で評価した。

$$\frac{\partial -\overline{u'^2} A}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (A D_h \frac{\partial u}{\partial x}), \quad D_h = \alpha h |u|, \quad (\alpha: \text{定数}) \quad (6)$$

(6) 式中 D_h を $h u_*$ のオーダーと考えると $u/u_* \approx 10 \sim 20$ であるから α の値は $0.05 \sim 0.1$ 程度になる。本研究では $\alpha = 0.05$ とした。また、本研究では簡単のため管路・開水路境界面においてよどみ点圧力処理²⁾は行っていない。

4. 計算結果と実験結果の比較

流れ方向の格子間隔 $\Delta x = 4(\text{cm})$ 、時間間隔 $\Delta t = 0.01(\text{sec})$ として実験条件のもとで計算を行った。そのさい、表-1に示したバルブ遮断時間の間に、上流端流量を初期の流量から0まで線形に減少させた。

まず、Run-1の結果を示す。図-5に対応する位置の圧力と時間の関係を図-8に示した。解析では非圧縮性を仮定しているため、遮断直後の水撃波は再現できないが、水撃波減衰後のサージングは実験結果とほぼ適合している。ただし、No.2の第一波の波形をみるとかなりの相違が見られる。これは、立坑Bの位置(No.9)の水位が管路天端より高くなり、立坑とバルブの間に空気が閉塞された状態である。この状態のとき、解析では閉塞された空気の圧力変化を無視しており、下流側からの圧力の揺れ戻しが上流に伝わらないことが原因の一つと考えられる。図-9には遮断開始後の水深分布を示した。基礎式中に鉛直加速度項を考慮していないため、境界面近傍

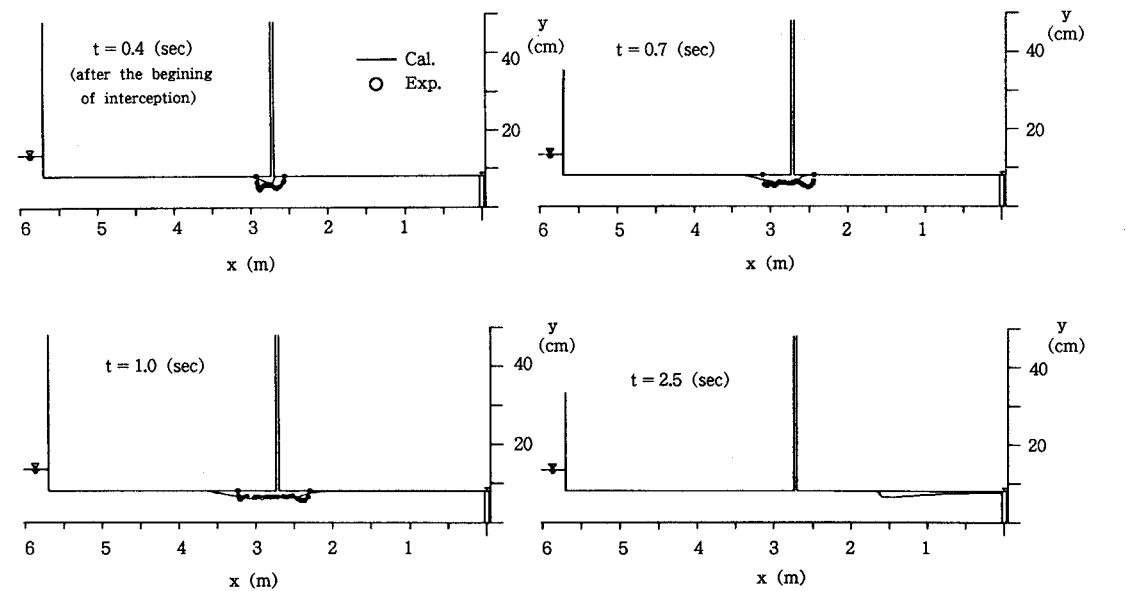


図-9 空気泡の浸入と水面形の変化 (Run 1)

の水面形は実験結果に十分適合していないが²⁾、本数値解析モデルを用いて少なくとも定性的には境界面の伝播を伴ったサージング現象を再現できることが確認できる。

Run-2は流量がRun-1の約2倍の場合であり、図-10に立坑位置の水深変動を示した。実験と計算結果にかなりの相違が見られ、先に述べたように閉じ込められた空気の圧力変化を考慮する必要性が示唆される。また、実験と計算結果ともに、遮断後の第1波より後に第1波のピーク値よりかなり大きい波が生じている。この原因を、図-10に示した計算結果の水面形の時間変化から考察すると、第1波目はRun-1と同様に揺れ戻しに伴うサージングであり、後続の大きな波は、図-12に示したように揺れ戻しの流れが上流端で反射し段波を形成しながら下流に伝播する際に形成されることがわかる。

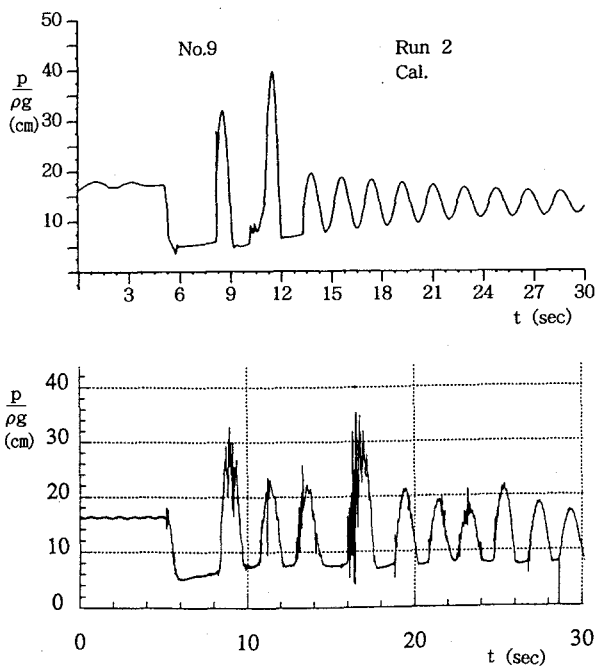


図-10 立坑水深と時間の関係 (Run-2, No.9)

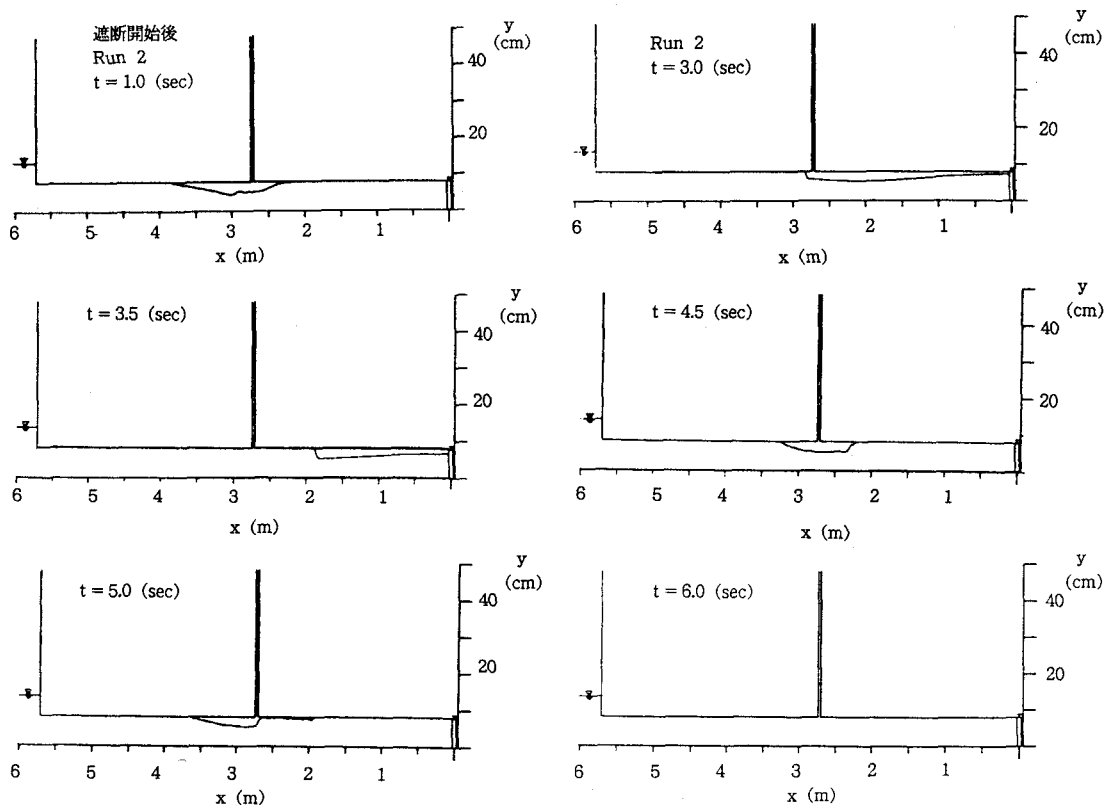


図-11 空気泡の浸入過程と水面形の変化 (Run-2)

5. 閉じ込められた空気圧力変化の簡易モデル

次に Run 2 を対象に、閉じ込められた空気圧力変化を図-13に示したように、立坑水位を用いて簡単に (7) 式で評価することを考える。

$$\frac{\Delta p_a}{\rho g} = \gamma(h_B - h(x)), \quad (\gamma: \text{定数}) \quad (7)$$

ここに、 Δp_a は大気圧からの圧力変化を表す。さらに、流れに及ぼす Δp_a による力を、開水路流れの運動量方程式 (2) の右辺に次式を付加することで考慮する。

$$(2) \text{ 式右辺の付加項: } -\frac{\partial}{\partial x}(\Delta p_a A) + \Delta p_a B_s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (B_s \text{ は水面幅}) \quad (8)$$

(8) 式は、レイノルズ方程式を積分して (2) 式を導く際に、水面の空気圧を 0 とせず Δp_a において得られる項である。ただし、本研究では閉じ込められた空気の体積変化を考慮しておらず、今後空気の運動をモデルに考慮する必要性を把握するために (8) 式を導入した。また、(7) 式中の γ の値は、安定な数値解が得られる上限値として試行錯誤的に $\gamma = 0.4$ とした。そのときの Run 2 の計算結果を示したのが図-14である。実験結果 (図-10) との適合性はいまだ十分ではないが、閉じ込められた空気圧力増加により揺戻しによる波が 2 波生じ、空気圧変化を考慮しない場合より計算結果はかなり改善されている。

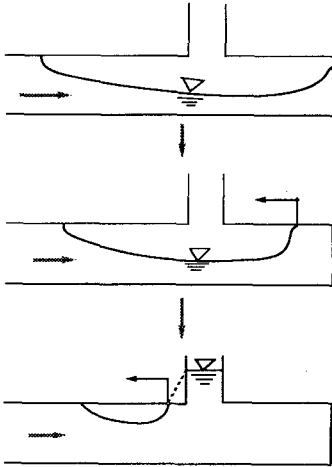


図-12 圧力波の形成機構

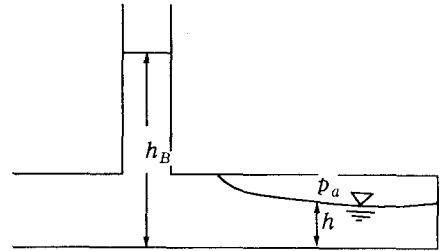


図-13 閉じ込め空気圧変化の簡易モデル

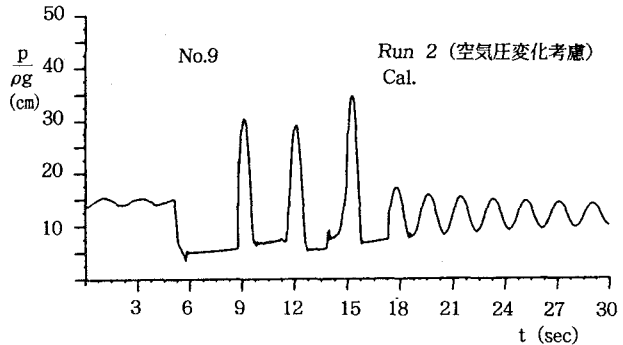


図-14 空気圧変化を考慮した立坑水深と時間の関係
(Run-2, No. 9)

6. おわりに

本研究は、任意の位置に複数の境界面が発生する管路系のサージング現象を対象にして、管路・開水路流れ境界面の伝播を考慮した非定常流解析法²⁾を用いて、サージング現象の再現を試みるとともに、数値解析法の有効性と適用限界を明らかにした。今後、より多くの実験条件の下で解析を行うとともに、空気流も同時に解く方法を開発するなどモデルを改良する必要がある。最後に、本研究を行うに当たって多大な協力を頂いた京都大学大学院・岩田道明氏に深く感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1) 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, 1993, pp.593-605.
- 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Ⅱ/29, 1994 (印刷中).
- 3) Harten, A: High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws, J. Comp. Physics, Vol.49, 1983, pp.357-393.