

管路・開水路流れ境界面の発生する管水路のサージング現象

多田 彰秀・細田 尚・井上 和也・北原 政宏

FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS OF PARTIALLY FREE SURFACE UNSTEADY FLOWS IN A CIRCULAR CONDUIT

By Akihide TADA, Takashi HOSODA, Kazuya INOUE and Masahiro KITAHARA

Synopsis

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 tail-race 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. The maximum elevation of water surface at vertical shafts is related to the hydraulic variables such as the discharge and the position of vertical shafts. 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.

1. 緒 言

下水道、地下放水路網などの地下水路系における水理学的な過渡現象では、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遷移することが特徴的である。このような水理現象は、Fig. 1 に示す発電所放水路系においても負荷の急遮断等による流量の急変時に生じることが知ら

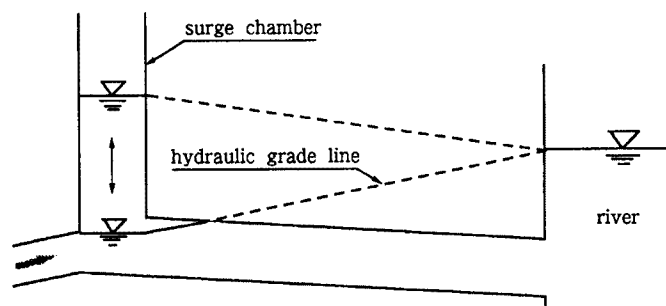


Fig. 1 Approximate graphical method for surging at initially full flowing tail-race tunnel [1].

れている。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、さらに放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。林¹⁾は、このような流れ込み式発電所放水路のサージングに関して、Fig. 1 に示すように放水路上流端の立坑水位と下流水位を結んだ直線で水面形を近似した基礎式を提案するとともに、水理実験を通して解析法を検証した。しかし、林の提案する簡易解析法では境界面が上流端立坑の近傍に存在していることを前提条件としているため、Fig. 2 に示すような複数の立坑が存在し、境界面が水路内に複数発生するような場合への適用は難しいと考えられる。さらに、そのような管路系の立坑内における水位変動、境界面の上・下流方向への伝播および揺れ戻しに伴う立坑水位の急上昇などの基本的な特性について水理実験より明らかにした研究は少ないと思われる。

以上のようなことを考慮に入れ、本研究では、まず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、水理実験より管路・開水路流れ境界面の発生に関する基本的な水理特性を明らかにする。ついで、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²⁾を 1 次元流れに適用し、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について検討する。

2. 水理実験の概要

2.1 実験装置

水理実験は、西松建設株式会社技術研究所水理実験棟に設置された長さ 6.0 m、直径 80 mm の円形断面を有するアクリル製の管路で行われた。Fig. 3 に示すように、この管路は直径 40 mm の 3 本の円筒立坑を有しており、後述する実験条件に応じて取り外しが可能である。上流部および下流部には水頭差を維持するために、それぞれアクリル製の水槽（長さ 2.0 m × 幅 0.8 m × 高さ 0.6 m）が設けられている。さらに、上流水槽より 0.3 m 下流側には流れを遮断するための手動バルブが取り付けられている。また、管路の路床こう配

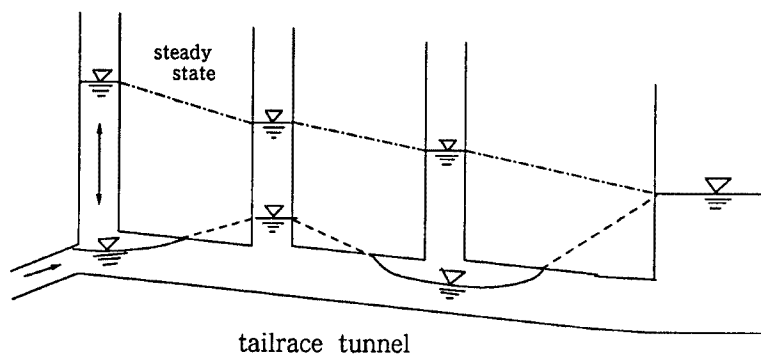


Fig. 2 Surging phenomena with multiple interfaces.

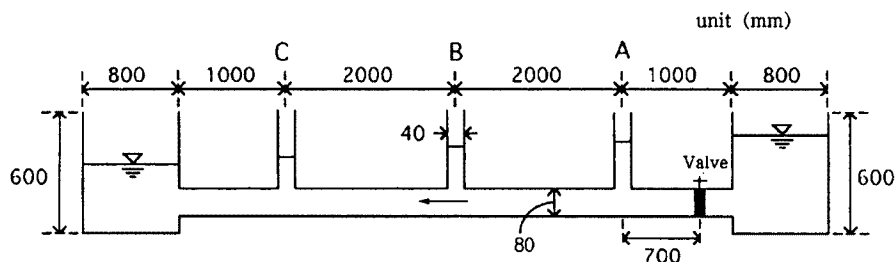


Fig. 3 Experimental set-up for laboratory tests.

は水平とした。

管路内の初期流量は、上流水槽の上流部に設けられている三角堰を用いて測定した。上流水槽および下流水槽における水深変化の計測は、容量式波高計（CP-306 型）を用いて行った。さらに、**Fig. 4** に示される管路底部の水圧（No. 1～No. 12）は、圧力変換器（PGM-02G）を用いて計測された。なお、全ての計測データはサンプリング間隔 0.01（sec）で、AD 変換ボードを搭載したパーソナル・コンピュータ（PC-98 NOTE）に取り込まれ、統計処理された。

2.2 実験条件

実験は、初期流量 Q_0 および下流水槽の越流堰高さ H_0 に対応する定常な管路流れにおいて、上流水槽より 0.3 m 下流部の手動バルブを急閉する（流量をゼロまで急減させる）ことによってサージング現象を発生させた。その後、水圧の測定と並行して、立坑水位が急激に下降し境界面が上・下流両側に伝播する過程および、その後揺れ戻しによって再び立坑水位が急上昇する過程をビデオおよび写真撮影した。**Table 1** に示すように、初期流量、下流水槽の越流堰高さ、立坑の本数および立坑位置を変化させた 19 通りの実験を実施した。

3. 実験結果の考察

3.1 空気泡の侵入過程

(1) 立坑水位の低下に伴う空気泡の満水管路への侵入過程

立坑が B のみの Run 65 では、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下降が生じる。これに伴って空気泡が立坑より直径 80 mm の満水管路へ侵入する過程を撮影したのが **Photo 1** である。これらの写真から、上・下流方向にほぼ対称形で侵入した空気泡（**Photo 1 (c)** 参照）が管路・開水路境界面を形成し、上・下流へと伝播していく一連の過程が読み取れる。特に、下流側の境界面先端部の伝播速度が上流側先端部のそれよりも大きいことが確認される。さらに、境界面先端部はくびれた形状（**Photo 1 (e)** 参照）を示し、その背後に波状の水面形が追隨していることも認められる。なお、時間間隔は約 0.125 (s) である。

(2) 揺れ戻しに伴う空気泡の管路から立坑への侵入過程

上述のような現象が発生した後、下流側に伝播した境界面は、上・下流が逆転した水面勾配によって揺れ戻しを受ける。立坑-B の位置では、空気泡を含んだ水塊が揺れ戻しによって吹き上げられる。さらに、水頭が最大値に到達した後、空気泡を含んだ水塊は管路内へ下降し、空気泡を立坑-B より上流側に閉じ込めることになる。**Photo 2** はこのような一連の過程を示している。なお、この場合も写真撮影間隔は **Photo 1** と同一 (0.125 (s)) である。

3.2 圧力の時間変化の特性

(1) 時系列特性

Fig. 5 (a)～(c) は、Run 65（立坑が B のみの場合）の計測された圧力と時間の関係を示したものである。**Fig. 5 (a), (b), (c)** は、それぞれ立坑-B の上流側 (No. 3)、立坑-B 直下 (No. 9) および立坑-B の下流側 (No. 12) における圧力の時系列である。**Fig. 5 (a)** には、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確認される。一方、立坑位置から下流側では水撃波の影響は見られないことが **Fig. 5 (b), (c)** からわかる。すなわち、水撃波は立坑位置までの間で速やかに減衰し、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ものと考えられる。なお、水撃波は初期流量および越流堰高が大きいほど生じやすい傾向にあることも他の実験条件との比較から明らかになった。

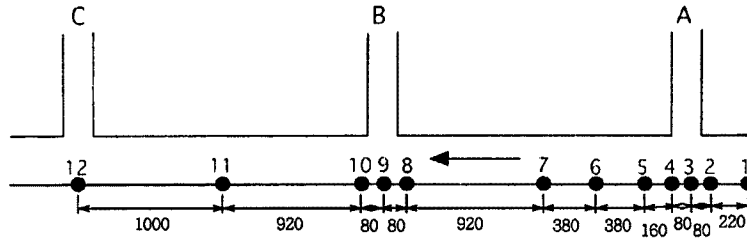


Fig. 4 Allocation of strain gage transducers.

Table 1 Hydraulic variables for laboratory tests

Run No.	Downstream Water Level H_0 (cm) *	Discharge Q_0 (l/s)	Required Time for Valve Closing (sec)	Reynolds Number	Number of Vertical Shaft
50	12.0	1.975	0.69	27,916	3 C B A
51	12.0	3.346	0.73	47,294	3 C B A
52	12.0	5.112	0.75	72,256	3 C B A
53	10.5	1.959	0.76	27,690	3 C B A
54	10.5	3.341	0.72	47,224	3 C B A
55	10.5	5.079	0.69	71,789	3 C B A
56	9.0	2.080	0.60	29,400	3 C B A
57	9.0	3.403	0.50	48,100	3 C B A
58	9.0	5.212	0.60	73,669	3 C B A
59	12.0	1.934	0.70	27,336	2 B A
60	12.0	3.302	0.64	46,672	2 B A
61	12.0	5.360	0.64	75,761	2 B A
62	12.0	1.971	0.74	27,859	1 A
63	12.0	3.512	—	49,641	1 A
64	12.0	5.214	0.64	73,698	1 A
65	12.0	2.007	—	28,368	1 B
66	12.0	3.370	0.61	47,633	1 B
67	12.0	5.059	0.60	71,507	1 B
68	13.5	1.780	0.60	28,800	1 B

* H_0 is measured from the bottom of the pipe (diameter 8 cm).

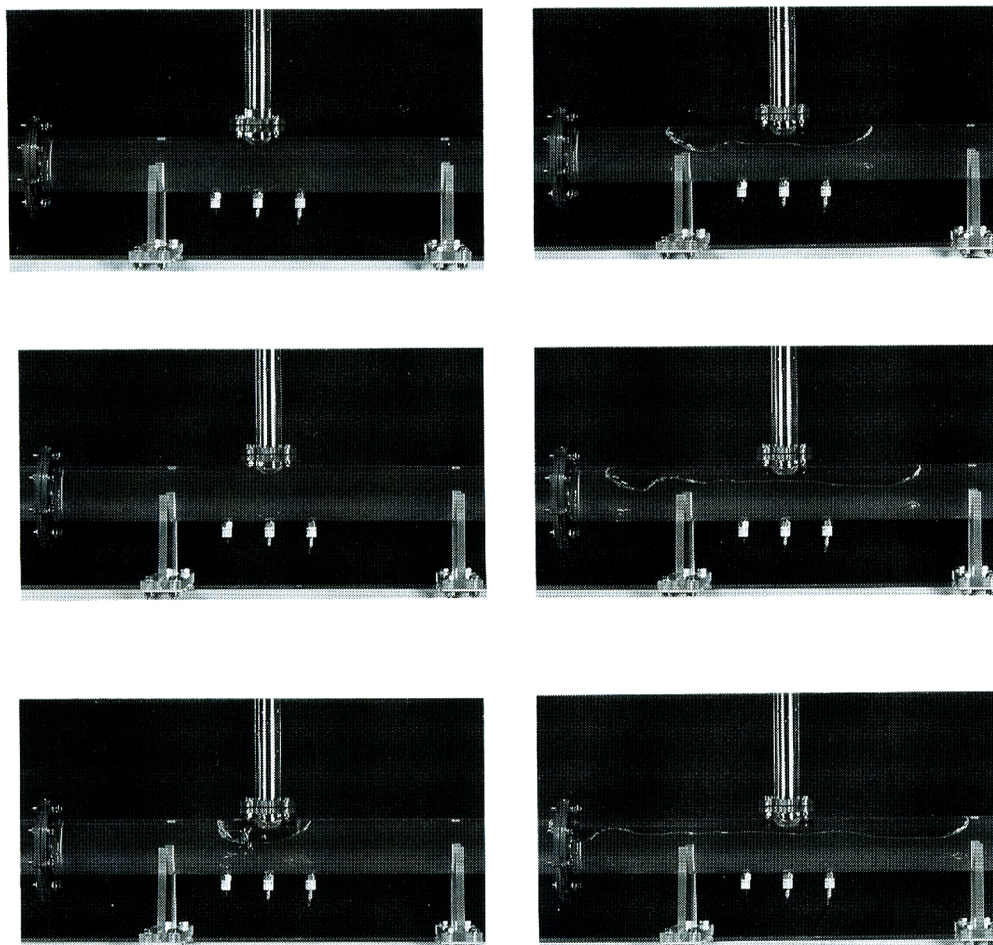


Photo 1 Air intrusion processes after interception of discharge (Run 65)

さらに、初期流量 Q_0 が Run 65 の約 2.5 倍の Run 67 について同じ位置の圧力の時系列を示したのが Fig. 6 (a)～(c) である。第 1 波目の圧力ピーク値よりも 4 波目のピーク値の方が大きな値をとっていることが確認される。ビデオ撮影から、第 1 波から第 3 波までは下流からの揺れ戻しに伴うサージングであり、第 4 波は Fig. 7 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て下流に伝播したものと考えられる。

Fig. 8 (a)～(c) は、Run 52 (立坑 A, B, C 3 本の場合) の立坑 A, B および C の位置で計測された圧力の時系列である。Fig. 8 (b), (c) に見られる大きな波の前の振動は揺れ戻しに伴うサージングであり、大きな波は Run 67 の場合に述べた揺れ戻し後の上流端での反射波と考えられる。反射波の伝播速度が速いため、各立坑における水圧のピーク値はほぼ同時刻に生起していること、さらに、各立坑で圧力が緩和されるためピーク値は下流側の測点ほど小さくなることがわかる。

(2) 水圧の最大値 p_{max} の特性

Fig. 9 は、立坑が 3 本存在する Run 50, 51 および 52 を対象に、水圧の最大値 $p_{max}/\rho g$ と初期流量 Q_0 の関係を示したものである。ここに、 $p_{max}/\rho g$ は、計測位置の水圧の最大値を示す。各立坑ともに $p_{max}/\rho g$ の値は、流量の増加とともに大きくなることが確認される。また、手動バルブに近い立坑ほど $p_{max}/\rho g$ は大きい値を示している。さらに、Fig. 9 には立坑 A を対象にして、Run 53～Run 58 の $p_{max}/\rho g$ の値もプロ

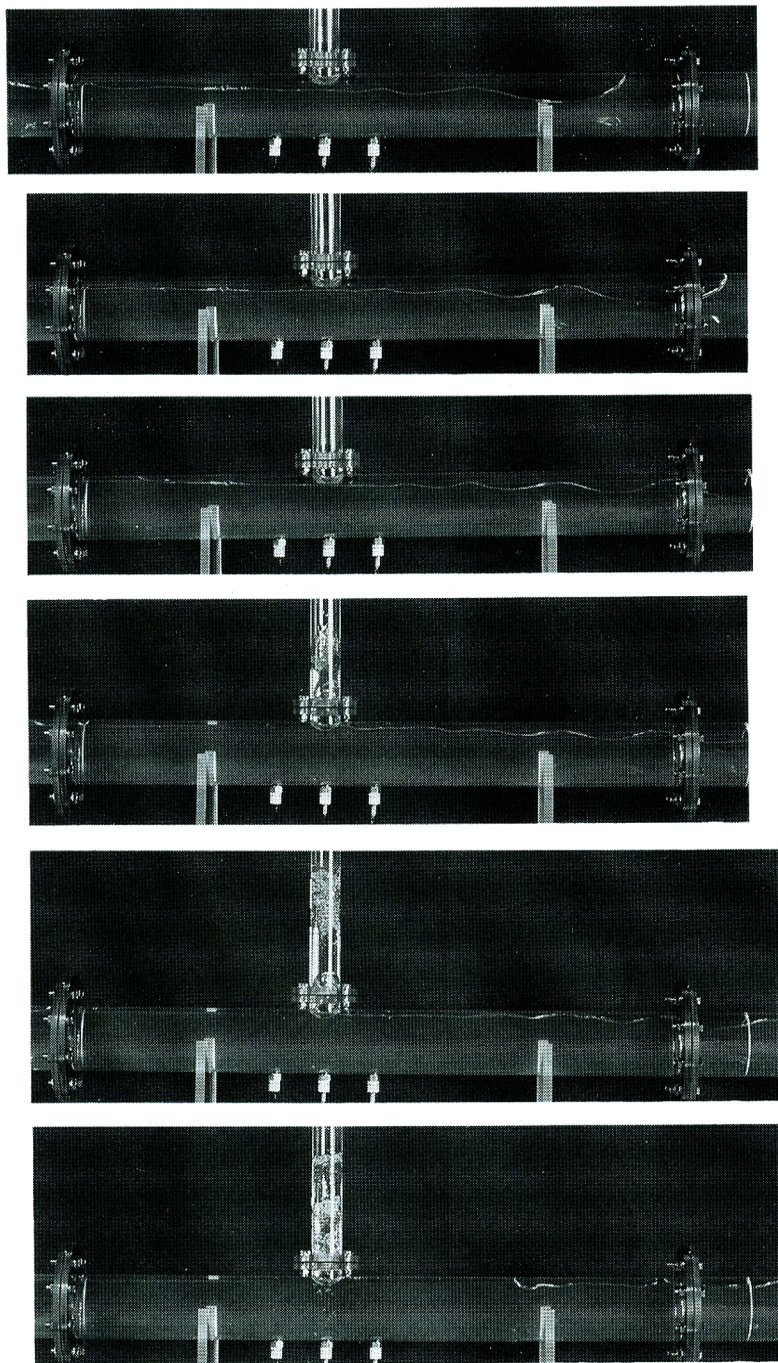
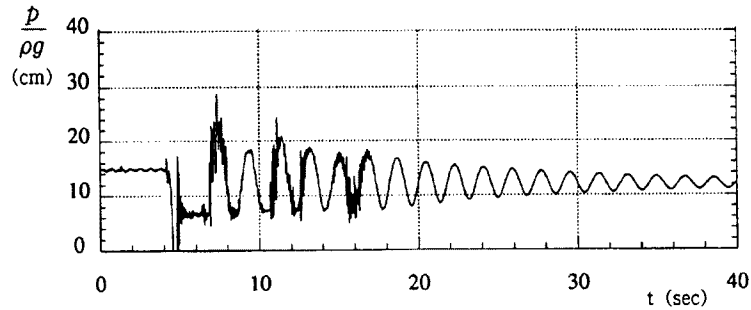


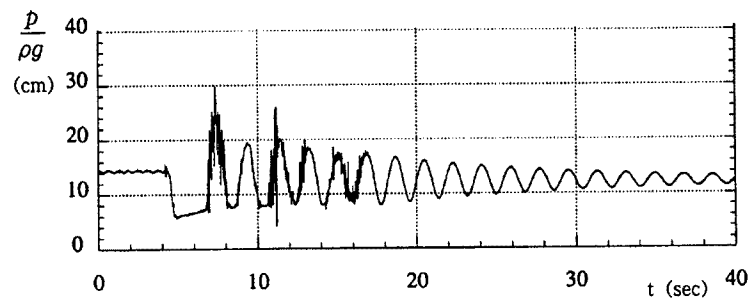
Photo 2 Behaviour of air cavity with oscillation in a vertical shaft (Run 65)

ットされており、下流水槽に設けられた越流堰の高さ H_0 の変化が $p_{max}/\rho g$ に及ぼす影響について比較されている。図より堰高さ H_0 が大きいほど、水圧の最大値も大きくなっていく傾向が読み取れる。

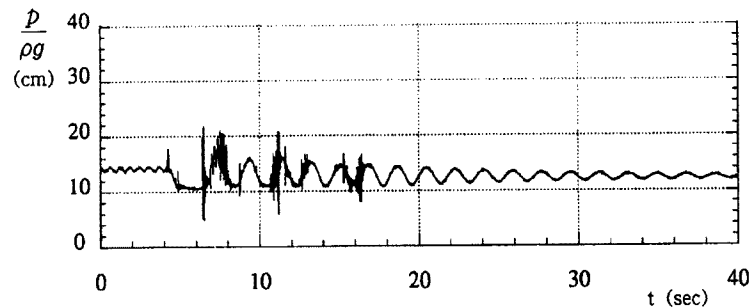
Fig. 10 (a) および (b) は、立坑の本数が 1 本で、立坑位置が A (Run 62～Run 64) または B (Run 65～Run 67) の場合の $p_{max}/\rho g$ と Q_0 との関係を示したものである。両図より、 $p_{max}/\rho g$ の値は流量の増加とともに大きくなる傾向が認められる。しかしながら、その増加率は立坑-Bの方が立坑-Aよりも著しく小さい。これは、立坑位置がBの場合は揺れ戻しの波と流れが立坑で減勢され、上流端で反射後の波が弱く



(a) No.3



(b) No.9



(c) No.12

Fig. 5 Temporal variations of pressure (Run 65).

なるためと考えられる。

4. 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・開水路流れの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²⁾を適用し、現象を数値解析的に再現する。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。(解析法の詳細は参考文献2, 3を参照されたい。)

4.1 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、Fig. 11に示した座標系の下で次のように書き表わされる。

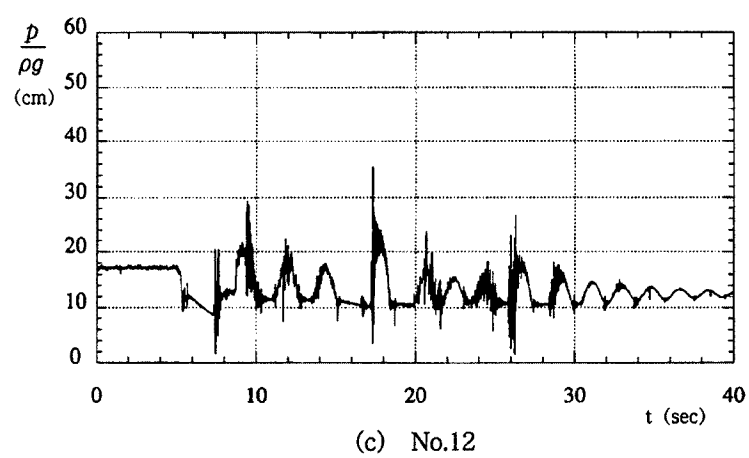
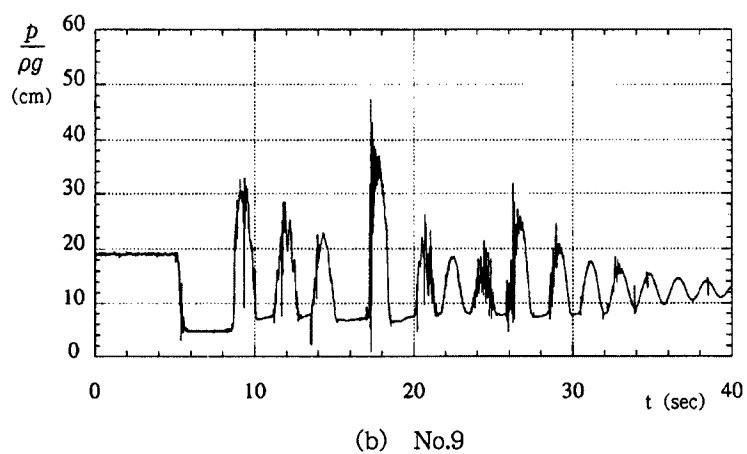
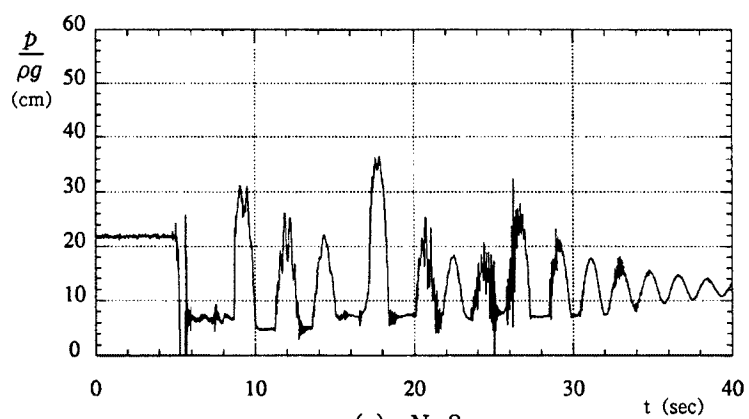


Fig. 6 Temporal variations of pressure (Run 67).

(開水路流れ)

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

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

(管路流れ)

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

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

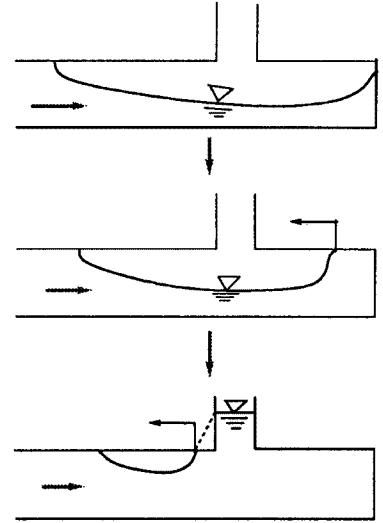


Fig. 7 Pressure wave generated at the upstream end.

ここに、 x ：空間座標、 t ：時間、 A ：流水断面積、 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。また、 $\overline{\quad}$ は時間平均を表し、 $\overline{\quad}$ のない水理量は全て時間平均量である。

4.2 数値解析の手順

数値解析法として有限体積法を用いる。**Fig. 12** 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。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の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⁴⁾を用いる。

管路と開水路流れの境界面の流量は、**Fig. 12** 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。

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

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。

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

(6)式中 D_h を hu_* 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・開水路境界面におけるよどみ点圧力処理³⁾は行っていない。

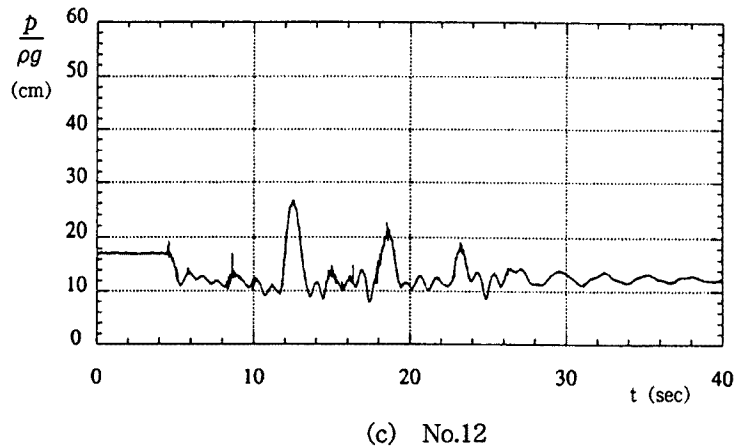
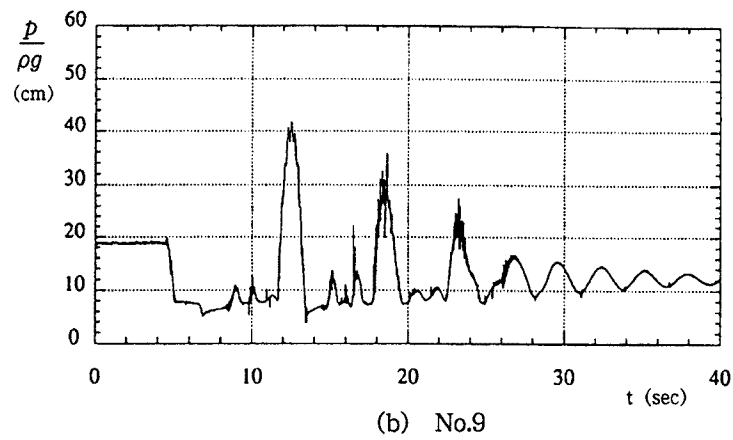
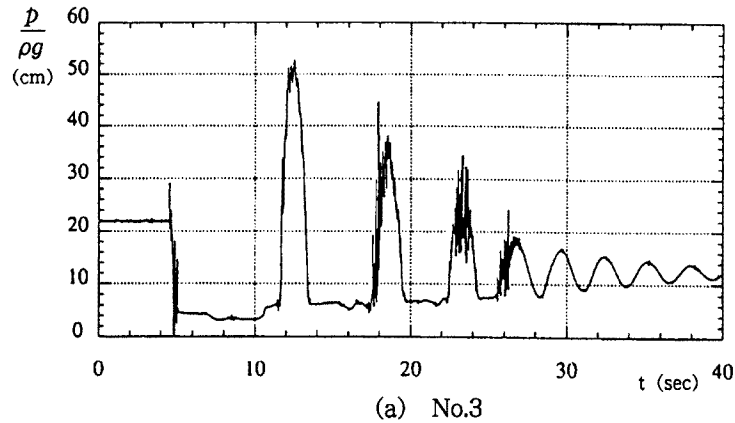
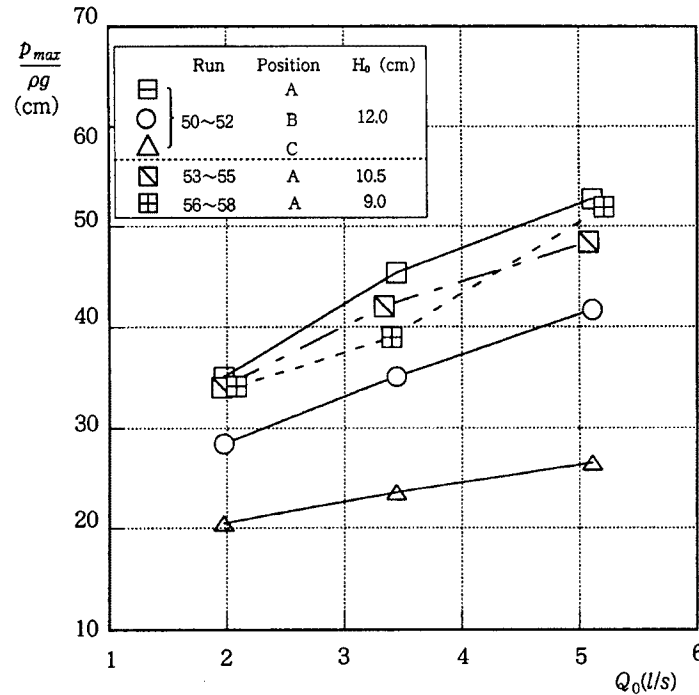
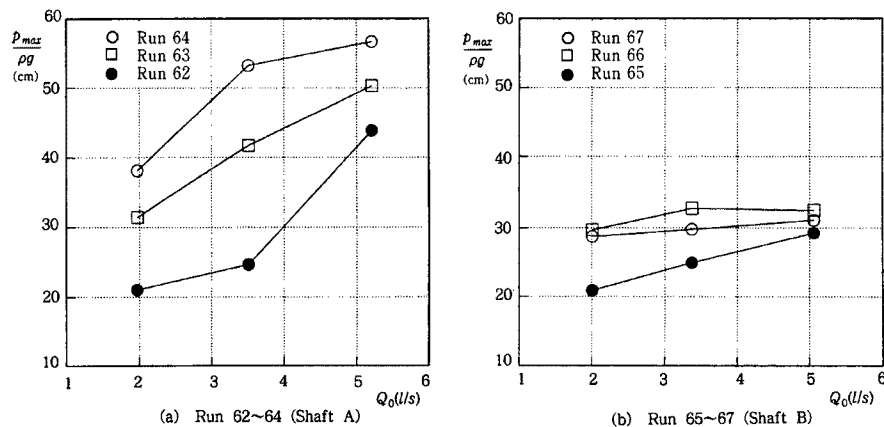


Fig. 8 Temporal variations of pressure (Run 52).

4.3 解析結果の考察

Table 1 に示した Run 68 (立坑 B のみ, 下流水位: 管路天端より 55 mm) の再現計算を行った。流れ方向の格子間隔 $\Delta x = 4$ (cm), 時間間隔 $\Delta t = 0.01$ (sec) として実験条件の下で計算を行った。そのさい,


 Fig. 9 Relation between p_{max} and Q_0 in the case of three vertical shafts (Run 50~58).

 Fig. 10 Relation between p_{max} and Q_0 in the case of one vertical shaft (Run 62~67).

流量の遮断時間を 0.6 (sec) とし、上流端流量を初期流量から 0 まで線形に減少させた。

Fig. 13 に圧力と時間の関係を示した。数値解析では流体の非圧縮性を仮定しているため、遮断開始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両者ほぼ一致している。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。**Fig. 14** には遮断開始後の水深分布を示した。境界面の圧力処理を行わず、また開水路流れの運動方程式中に鉛直加速度項を考慮していないため、境界面近傍の水面形は実験結果に十分には適合していないが、数値解析によっ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。

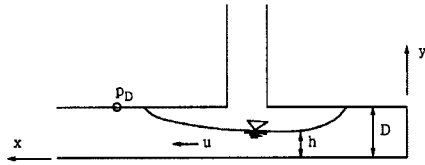


Fig. 11 Coordinate system for numerical analysis.

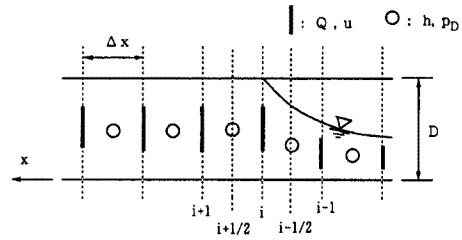


Fig. 12 Arrangement of hydraulic variables.

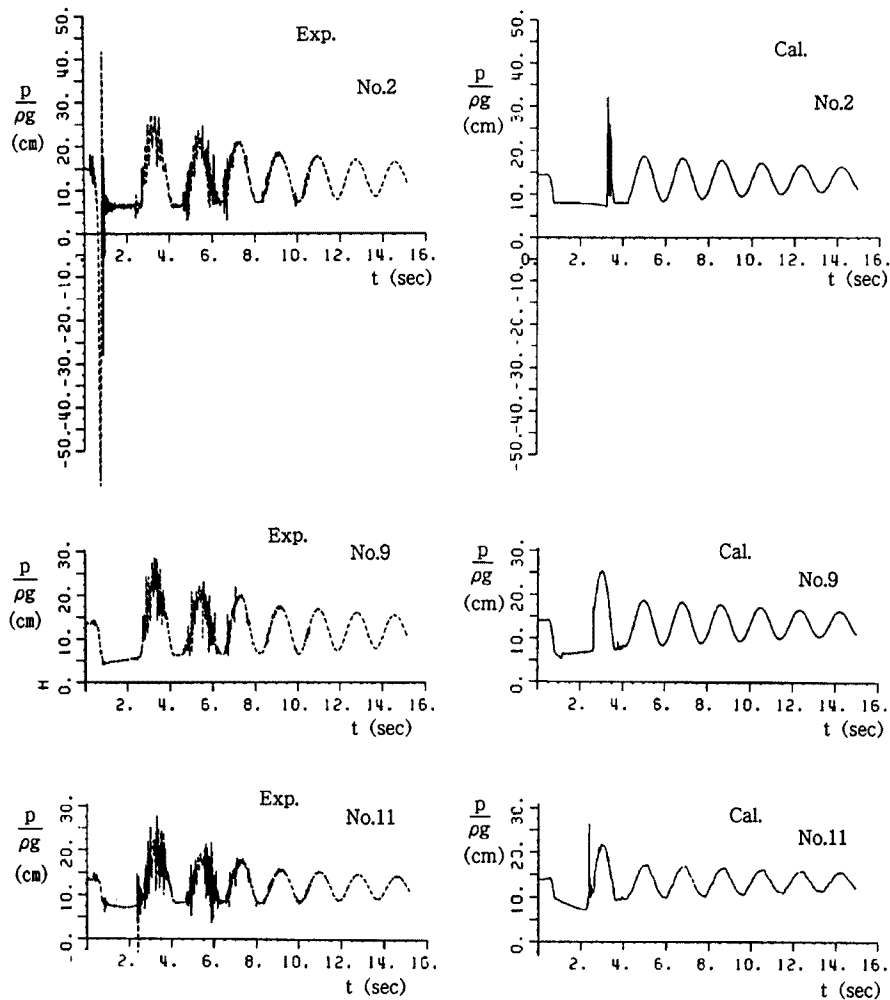


Fig. 13 Comparison of calculated temporal pressure variations to experimental results (Run 68).

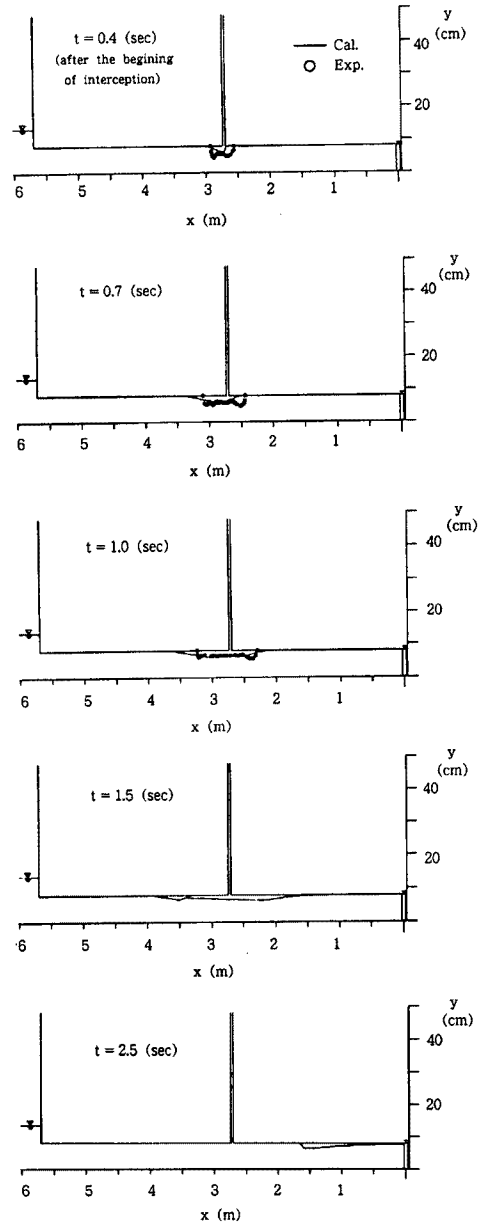


Fig. 14 Intrusion process of air cavity and free surface profile (Run 68).

5. 結 語

本研究では、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、まず水理実験より管路・開水路流れ境界面の移動を伴う非定流の基本的な水理特性を考察した。さらに平面2次元流れ場を対象に提案された管路・開水路境界面の伝播を考慮した非定常流解析法を適用し、円管路の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について検討したものである。得られた主要な成果をまとめると次のようになる。

- ① 立坑 3 本を有する管路系を用いて負荷遮断実験を行い、管路・開水路流れ境界面の伝播を伴うサージング現象の基本的特性を検討した。その結果、管路内の圧力波には遮断後の揺れ戻しに伴うサージングに起因する波と、揺れ戻しの流れが上流端で反射し段波を形成して下流に伝播する波の二通りがあることが分かった。
- ② 遮断後の圧力のピーク値と水理条件の関係を考察し、ピーク値は流量の増加とともに増加すること、立坑が一つの場合、立坑が上流側に置かれた方が下流側の場合よりピーク値が大きく流量の増加に伴う増加率も大きいことが確認された。
- ③ 立坑が一つの場合の実験結果を非圧縮性流体を仮定した数値解析モデルを用いて再現した。その結果、空気が管路内に閉塞された場合にはその空気圧の変化をモデルに考慮する必要があるが、計算結果はほぼ実験結果に適合し、数値解析モデルの有効性が示された。

以上のように、本研究の数値解析モデルは境界面の伝播を伴う管水路のサージング現象を再現する有効な方法の一つと考えられる。今後、より多くの実験条件の下での解析を行い、モデルの有効性と適用限界について検討して行きたい。

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・岩田通明氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hayashi, T.: Simplified Solution of Surging at the Surge Chamber at the Initially Full—Flowing Tail—Race Tunnel due to Load Decrease, 土木学会論文集, 第 71 号, 1960, pp. 1 ~ 6.
- 2) 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, 1993, pp.593-605.
- 3) 細田 尚・多田彰秀・井上和也・北原政宏: 満管路への空気の侵入過程に関する数値解析, 第 7 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 1993, pp.371-374.
- 4) Harten, A. High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws, J. Comp. Physics, Vol. 49, 1983, pp.357-393.