

放水槽を有する放水路の水位変動特性と その計算方法

CHARACTERISTICS OF SURGING DISCHARGE CHANNEL WITH BASIN
AND A NUMERICAL SIMULATION METHOD

大谷英夫¹, 東江隆夫², 石野和男³

Hideo OHTANI, Takao TOUE, Kazuo ISHINO

¹ 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

² 正会員 M.S 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

³ 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

In an intake and discharge channel of an electric power plant or a LNG plant, surging phenomena of water may cause a siphon break or an overflow at pits, and then may give a damage to the facility. A new numerical simulation method to predict surging was developed. In the method, the "slot model" was applied to the pressurized flow, and the MacCormack's scheme is used to simulate the mixed flow condition of sub-critical and super-critical flow. The water level in a discharge basin which is usually set at the end of the discharge channel can be calculated simultaneously. The laboratory tests were carried out to verify the simulation model for three types of channels. Three types of channels were a pressurized channel, an open channel and a channel which had a vertical bend at the end. All the channels have a discharge basin at the end. It is shown that the model can simulate an unsteady surging phenomenon for almost all types of channels.

Key Words : intake channel, discharge channel, surging, slot model, MacCormack's scheme

1. 序論

発電所やLNGガスプラントなどでは大量の冷却水, 加熱水が取水口, 取水路, 循環水管, 放水路, 放水口の経路で循環している。取水路や, 放水路の水位変動(サージング)が増大した場合, 循環水管のサイフォン切れ, 水路の立て坑(ピット)からの溢水等周辺施設に損害を与える。そのため, 取放水路の水面変動を予測・防止することは設計もしくはポンプ運転上重要な課題である。

水位変動の要因は, 取水口や放水口前面の波浪と, ポンプの起動・停止に伴う圧力変動である。臨海部に位置する発電所では海水取水が行われるため, 波浪の影響を直接受ける。影響の受け方は, 水路形式によって異なる。水路形式が圧力水路形式(満水状態)の場合(図-1, (a)), 立坑間のヘッド差により水路全体の水が動き, 立坑ではサージングが生じる。圧力水路のサージングの特徴は, 水路の自由サージ(水面の単振動)の周期と波浪の周期が同調するとサージングが非常に大きくなることである。開水路形式(自由水面を有する水路)の場合は, 消波が充分でないと

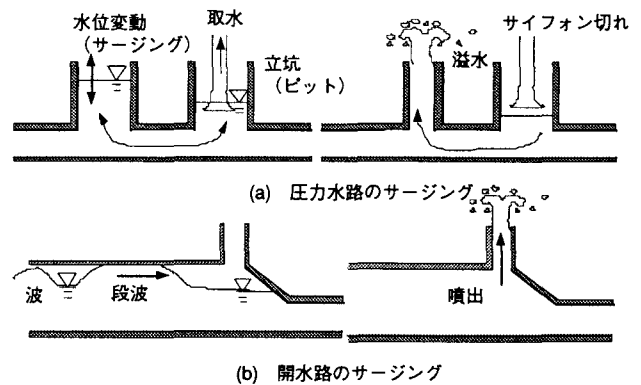


図-1 サージングの説明

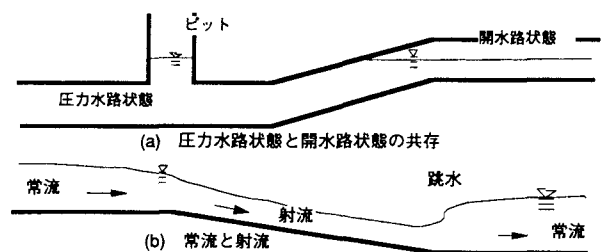


図-2 流れの形態

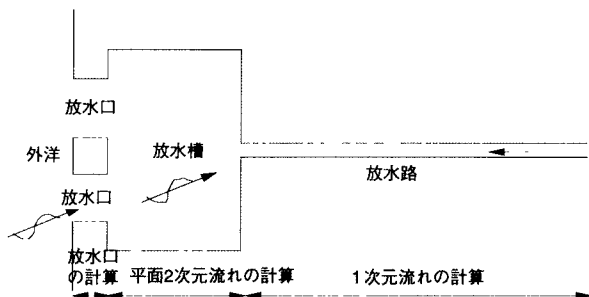


図-3 計算対象の放水路

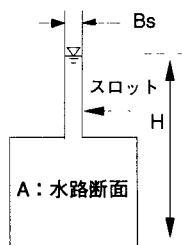


図-4 スロットモデル

水路内に波浪が進入し、水槽や水路の副振動を誘起する。また、常流、射流、それらの遷移状態（跳水）といった開水路特有の流れの形態が現れることもサージ現象を予測するためには考慮しなければならない（図-2）。

以上の水理現象に対し、従来は、水理計算に多大な労力を費やすか、現象を単純化した概略計算に留まることが多かった。例えば、圧力水路と、開水路とで異なる解析手法が用いられていたり、開水路特有の常流射流の遷移流れについても、その遷移点で計算方法を変えるなどの工夫を要していた。しかし、近年、数値シミュレーション技術が進展し、河川や下水道の流れに対して以上の水理現象を同時に解くことが試みられている^{1) 2) 3)}。

本研究では、圧力水路と開水路が共存する流れ、常流・射流が共存する流れをすべて同時に解く手法を取放水路に対して適用した。さらに、放水路に併設されることが多い放水槽の水面変動を、平面的に、しかも放水路と合わせて解き、水路サージの計算精度を向上させた。本論文では、この計算方法を概説し、模型実験により検証すると同時に、放水槽を有する放水路のサージ特性を示す。

2. 数値解析モデル

2.1 基礎式

本計算方法は、水路部の計算と水槽の計算に分けられる（図-3）。水路の計算は、一次元非定常開水路

流れの方程式を保存形で表した次式を用いた。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = b \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} Q \\ (p/\rho + Q^2/A) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$b = \begin{pmatrix} q \\ gA(S_z - S_f) \end{pmatrix}, S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$$

ただし、 t : 時間、 x : 流下方向の座標、 A : 流水断面積、 Q : 流量、 p : 圧力、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 q : 横流入流量、 S_z : 水路勾配、 S_f : 摩擦勾配、 n : マニングの粗度係数、 R : 径深である。差分化には、MacCormack 法^{2) 5)}を用いた（式（3）、（4））。この方法は、時間ステップ毎に粗い近似（予測子段階）とその修正（修正子段階）を繰り返す時間依存差分法の一つで、時間・空間的に二次の精度を持つ。もともと衝撃波の計算で使用されているものであり、近年、跳水や段波等、開水路流れ特有の現象にもその適用性が確認されている。

（予測子段階）

$$U_j^p = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{j+1}^n - F_j^n) + \Delta t b_j^n + V_j^n \quad (3)$$

（修正子段階）

$$U_j^{n+1} = \frac{1}{2} (U_j^n + U_j^p) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} (F_j^p - F_{j-1}^p) + \frac{1}{2} (\Delta t b_j^p + V_j^p) \quad (4)$$

ただし、 Δt : 計算時間間隔、 Δx : 差分間隔、 n : 現時刻、修正子段階を表すサフィックス、 V : 人工粘性である。ただし、人工粘性項は、常流・射流の遷移点である跳水を安定に計算するために岡部ら¹⁾の式（5）を用いた。

$$\begin{aligned} \text{（予測子段階）} \quad V_j &= -(D_{j+1} - D_j) \\ \text{（修正子段階）} \quad V_j &= +(D_j - D_{j-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$D_j = Ku_s h_j (U_{j+1} - 2U_j + U_{j-1}) \Delta t / \Delta x^2$$

ただし、 u_s : 摩擦速度、 h : 水深、 K : 経験係数である。

圧力水路区間はスロットモデル⁴⁾を用いた。これは、圧力水路に仮想のスロットを設け（図-4）、圧力水路を開水路として解くものである。スロット幅 B_s は、スロット内を伝わる波速が、圧力波の伝播速度と等しくなるように式（6）で設定する。なお、本モデルでは空気だまりの現象は考慮できない。

$$B_s = \frac{gA_0}{c^2} \quad (6)$$

ここに、 B_s : 水面幅もしくはスロット幅、 A_0 : 水路断面積、 c : 圧力波の波速である。

水槽の計算は、浅水流方程式（7）～（9）を基礎式とした。

ただし、 M , N : x , y 方向の線流量、 η : 水位、 D : 水

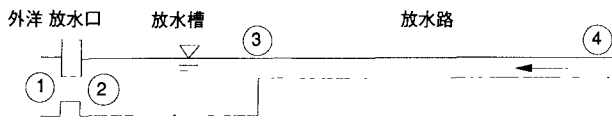


図-5 計算の境界

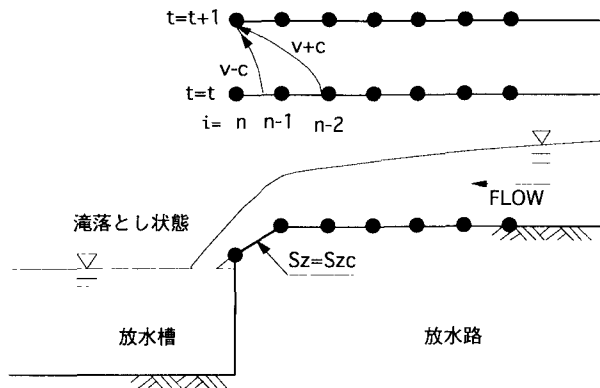


図-6 放水路と放水槽の境界の計算方法

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (9)$$

深である。差分化は、Leap-frog法を用いた。また、移流項は、計算を安定化させるために一次の風上差分を用いた。例えば、式(8)の第2項は式(10)であり、一次の精度である。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\lambda_{11} \frac{(M_{i+3/2,j}^{k-1/2})^2}{D_{i+3/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{21} \frac{(M_{i+1/2,j}^{k-1/2})^2}{D_{i+1/2,j}^{k-1/2}} + \lambda_{31} \frac{(M_{i-1/2,j}^{k-1/2})^2}{D_{i-1/2,j}^{k-1/2}} \right] \quad (10)$$

ただし、 λ_{11} 、 λ_{21} 、 λ_{31} は、 $M_{i+1/2,j}^{k-1/2}$ の正負により、0、1、-1の値をとる。また、 k は時刻を表すサフィックスである。

2.2 境界での計算方法

図-5に、本計算手法が一般的に対象としている放水系断面を示す。外洋と水槽を繋ぐ放水口は圧力水路とし、外洋①の水位変動と水槽と放水口の接続部②の水位差から放水口の流量を計算した。放水槽の計算は、②および放水路と水槽の接続部で流量境界とした。放水路の計算は③で水位境界、放水路の上流端④で流量境界とした。すなわち、③では放水路で計算した下流端流量を水槽へ渡し、水槽で計算した水位

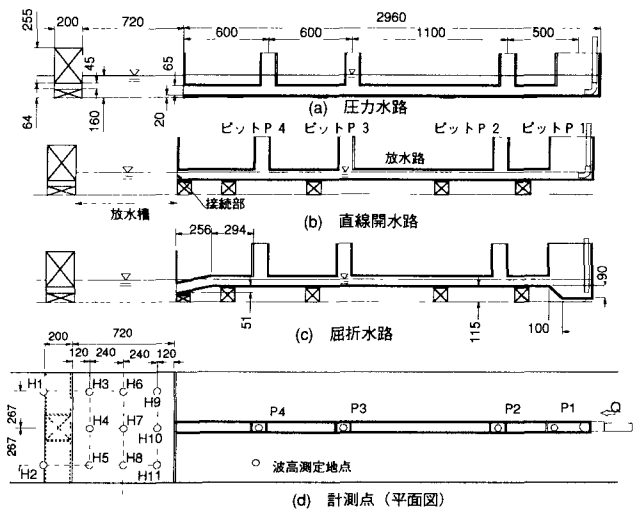


図-7 放水路模型と計測点

表-1 計算ケース

流れ状態	圧力水路	開水路		備考
水路形状				
波浪周期(s)	直線	直線	屈折	
1 70	CaseS-Pre	CaseS-Opn	CaseS-Bnd	波浪
10.00	CaseL-Pre	CaseL-Opn		長周期

を放水路へ渡す。③の放水槽内の水位が波により低下し、放水路から滝落とし状態となって水槽に流入する状況では、放水路下流端で射流を仮定し特性曲線法で次の時間の③水位を求めた(図-6)。すなわち、差分格子点*i*=*n*-1の限界水深より、放水槽の水位が低下した場合、*i*=*n*-1、*i*=*n*間は、*i*=*n*における流量を用いた限界勾配 S_{zc} にスイッチする。この過程により、*i*=*n*-1、*i*=*n*間の流れは射流となり特性曲線法⁶⁾により、次の時間ステップの下流端水深 h_n が計算できる。

3. 波による放水路のサーging特性と計算結果

3.1 模型実験の概要

放水路(図-7)は、長さ約3m、0.065m×0.065mの矩形断面で、4つのピットを設置した。放水路の下流には、長さ0.72m、幅0.8mの水槽を設置し、外洋とは、長さ0.2m、幅0.3m、高さ0.045mの放水口を2条で接続した。放水路の形式は3種類設定した。図-7(a)は、放水路全線にわたって圧力水路である。図-7(b)は、放水路の敷高が高い開水路とした。放水槽の水位変動が大きい場合、水路を遡上する波が水路の天井に接するようにした。図-7(c)は、下流側を屈折させ放水路の下流端は圧力水路、上流側は開水路となるようにした。放水槽の水位が低下した場合、

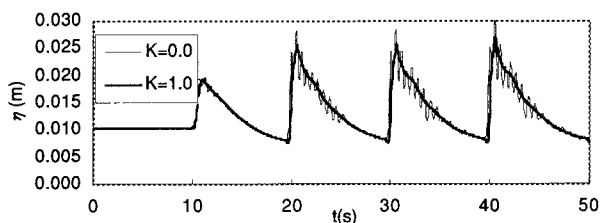


図-8 経験係数Kの効果

放水路の屈折点が支配断面となり斜路部で射流および跳水を形成する。図-7 (d) に計測点を示す。水路模型は、二次元水槽内に設置し、図-7の左側から造波した。放水口の前面では、波高計により水位 (H1, H2) を、放水路への放水流量は電磁流速計により計測し計算の境界条件とした。実験ケースを表-1に示す。放水流量は、 1.0 l/s である。放水口前面の波の条件は、実機換算で有義波周期13s程度の短周期波および80s程度の長周期波を模擬した。ただし、模型縮尺 $1/62.5$ とした場合である。

3.2 実験結果および計算結果の考察

放水路の計算は、 $\Delta x = 0.0367\text{m}$, $\Delta t = 0.0005\text{s}$, $c = 50\text{m/s}$ (CaseL-0pnでは、 $c = 10\text{m/s}$), $n = 0.009$ とし、放水口前面で実験で得られた水位を、上流端で実験流量を境界条件とした。人工粘性に用いた経験係数Kは $K = 1.0$ とした。図-8は、開水路を伝わる段波を計算した結果である、 $K = 0.0$ の場合は、MacCormack法に起因する数値振動が発生するが、 $K = 1.0$ とするとその振動を抑えていることが分かる。なお、圧力波の伝播速度 c は、クーランの安定条件 ($\Delta t < \Delta x/c$) から Δt を決定する要素である。したがって、理論的に求められる c を用いると、 Δt が非常に小さくなり、実用上計算効率が低下する問題が生じる。精度が高く効率的な計算を行うために、平井²⁾らは、タンク流出に対する数値実験を行い c の計算結果に与える影響を検討している。実用的には、平井らの検討結果が参考になると考えられるが、本論文では、実験結果に対して大きな誤差を生じない範囲で c を決定した。放水槽の計算は、 $\Delta x = 0.072\text{m}$, $\Delta y = 0.04\text{m}$ とした。

計算結果と実験結果を水位変動について比較する (図-9～14)。放水路が圧力水路で波浪周期 1.7s の CaseS-Pre (図-9) では、放水槽の水位変動は放水口前面の水位変動に比べて小さい。これは放水口が圧力水路であることによるフィルター効果で単周期成分がカットされたためである。計算でもこの効果が良く現れている。また、放水槽の計測点が H4, H7, H10 と放水口から離れるにしたがい水位変動量が大きくなる傾向が計算でもよく現れている。放水路でも、各ピットの水位変動が圧力水路のサーging特有の

sin波状の波形となること、P3はP2と比べ応答が大きいことなど、計算は実験結果をよく表している。P1では平均水位が実験と計算で異なる (目盛間隔が大きいため強調されて見える) が、これは水路への放流水の影響である。

放水路が圧力水路で波浪周期 10s の CaseL-Pre (図-10) では、放水槽の水位変動は放水口前面に比べて大きくなり、水位変動が増幅されていることが分かる。また、放水槽では水位が一様に上下していることが計測点 H4, H7, H10 から解る。一方、放水路では、ピット 1-放水槽間の自由サーgingの固有周期 (9.12s) が、波浪周期 (10.0s) に近いので、ピット 1 (P1) の水面変動が放水口前面の水面変動に大きく応答した。この実験結果から、外洋波の長周期成分が大きい場合、放水口のフィルター効果は効かず、放水路系の自由サーgingの固有周期に外洋波の長周期成分が近い場合は大きく応答してしまうことが指摘される。計算は、造波初期の乱れが載っている3波を除けば、実験結果とよく一致している。

放水路が直線開水路で波浪周期 1.7s の CaseS-0pn (図-11) では、放水槽内の水位変動が波として放水路を遡るため、放水路を伝播する波の峰が尖った波形を示した。また、その遡上波の波高は、放水路を遡上するにつれて減衰した。CaseS-preと比較すると、放水槽内の水面変動はほとんど変わらないが、放水路内での水位変動の増幅が、開水路状態である CaseS-0pnでは見られない。放水路内の最大水位もせいぜい放水槽の最大水位程度までしか上昇しない。計算結果も開水路を遡上する波の様子をよく表現している。

放水路が直線開水路で波浪周期 10s の CaseL-0pn (図-12) では、放水槽の水位変動が段波として、かつ、波頂が放水路の天井に付いた状態で放水路を遡上した。P3の時系列では、段波が通過すると急激に水位が上昇し、その後緩やかに水位が低下して行くことが分かる。CaseL-preと比較すると、CaseS-0pnとCaseS-preの比較と同様、開水路であるため水位の顕著な増幅は発生しない。したがって、外洋波に大きな長周期成分が含まれる場合の水位変動抑止の対策として、放水路に開水路区間を設けることが一つの策となると言える。計算も実験をよく表現している。図-10と同様、造波直後の3波を除けば、計算は実験をよく表している。

放水路が屈折開水路で波浪周期が 1.7s の CaseS-Ben (図-13) では、放水槽の水位変動により斜路部で射流・常流の遷移を繰り返した。その状況の計算結果を図-13に示す。放水槽の水位が低下すると水路斜

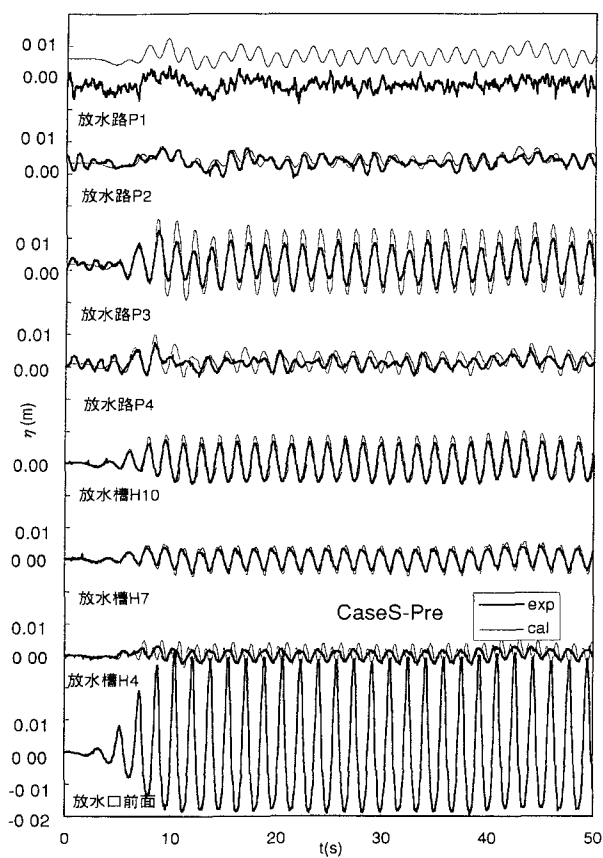


図-9 水位変動に対する実験と計算の比較 CaseS-Pre

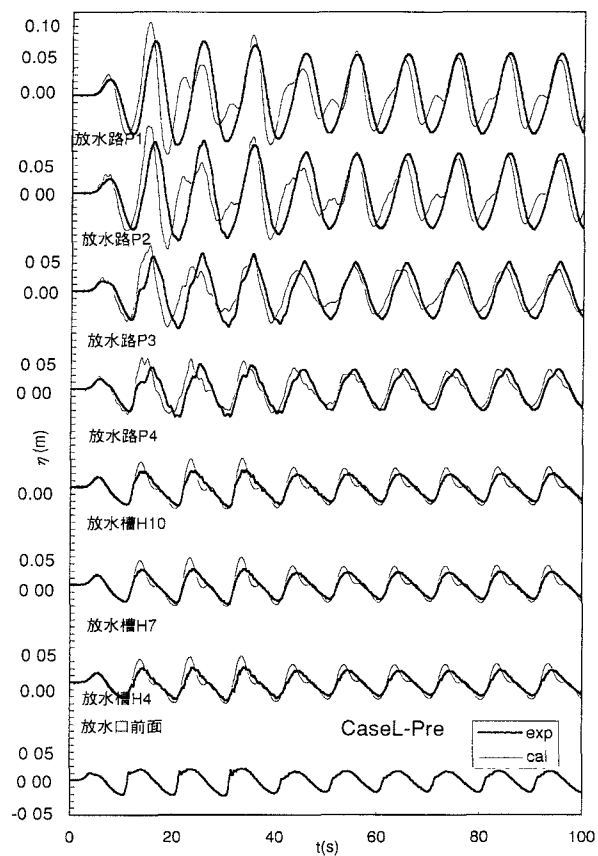


図-10 水位変動に対する実験と計算の比較 CaseL-Pre

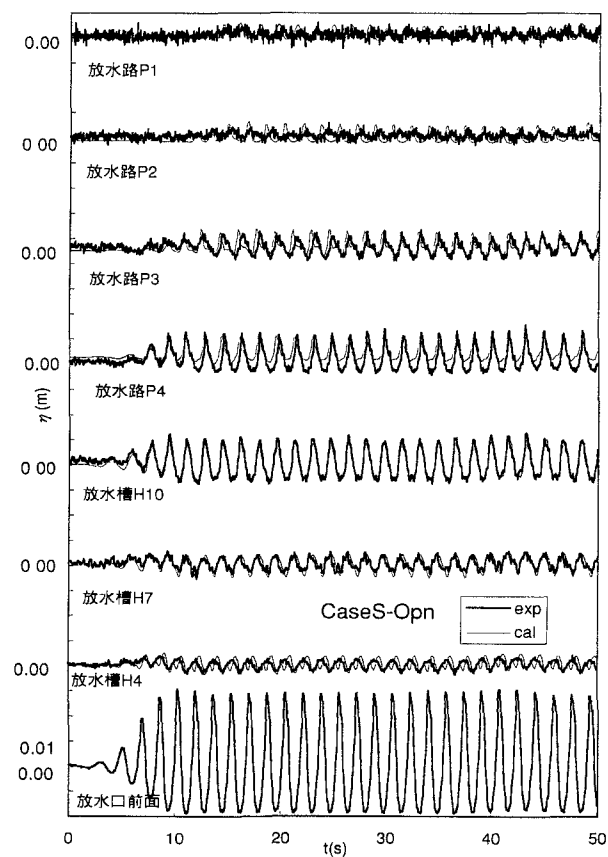


図-11 水位変動に対する実験と計算の比較 CaseS-Opn

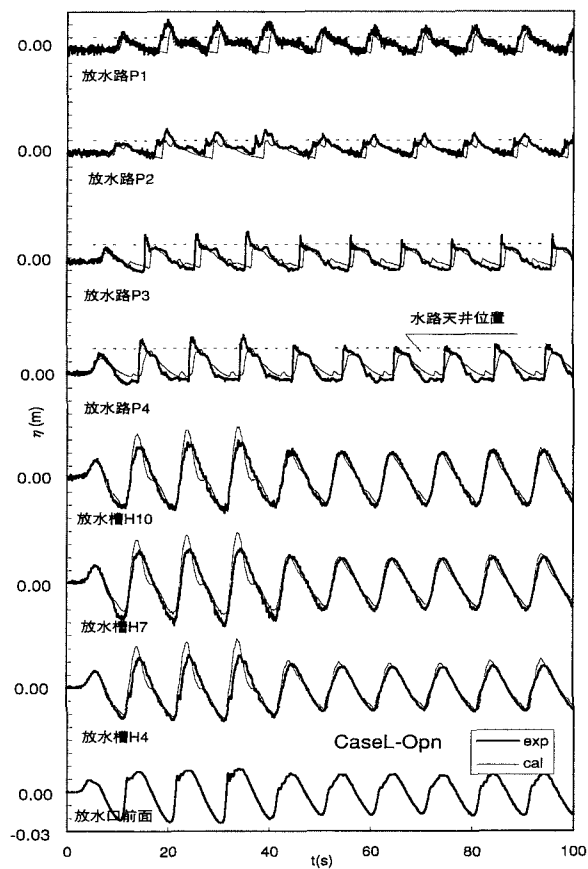


図-12 水位変動に対する実験と計算の比較 CaseL-Opn

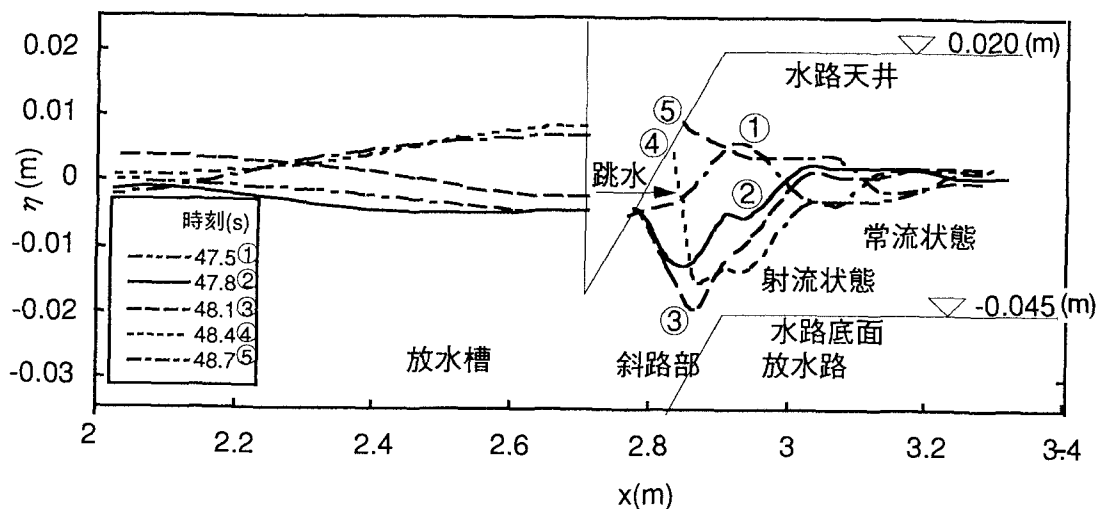


図-13 放水槽と斜路部の水面形状の計算結果 CaseS-Ben

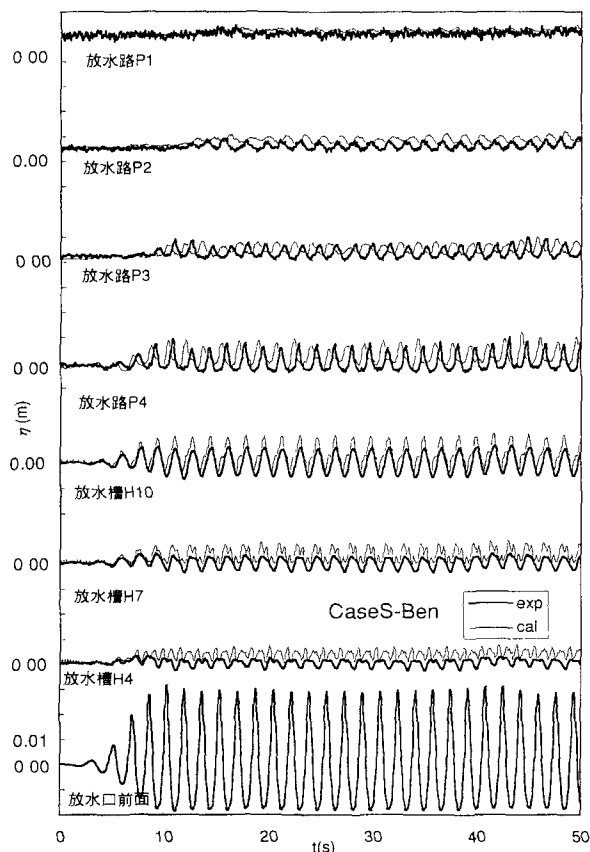


図-14 水位変動に対する実験と計算の比較 CaseS-Bnd

路部で射流が生じ、水路の下流端では跳水が発生する(図-13①→②)。放水槽の水位上昇に伴い水路斜路部で発生した跳水は、放水路の上流を遡る(図-13③→⑤)。放水路を遡る跳水が段波となり、放水路の水位変動を引き起こした。水位変動の時間変化を図-14に示す。放水路では水位変動の位相が計算で若干進んでいるものの、波高やその減衰状況についてはよく一致した。斜路部で発生する跳水等の複雑な水理現象の再現性に問題が残されていると言える。

4. 結論

放水槽を有する放水路のサージング現象に対し、放水路をスロットモデルを用いたMacCormack法を用い、放水槽をLeap-frog法で解く計算方法を示し、実験結果と比較した。実験では、放水路が開水路の場合は、放水槽の水面変動が波(段波)として放水路を伝播するものの、圧力水路の場合のような水面変動の増幅現象は見られないことを確認した。計算方法に関しては、跳水の水位変動に対する影響、位相のずれなどいくつかの課題はあるものの、全体的に実験結果を良好に再現した。

参考文献

- 1) 岡部・天羽・石垣：常流・射流の遷移を伴う不等流の数値計算法について，水工学論文集，第36巻，pp.337-342，1992.
- 2) 平井・道上・檜谷：地下水路系システムにおける実用的な水理解析手法，水工学論文集，第42巻，pp.829-834，1998.
- 3) 大谷・酒井・石野・荒川・水向：放水路内の段波による立て坑の水位変動現象と段波の抑止方法，水工学論文集，第42巻，pp.667-672，1998.
- 4) Chaudhry, M.H. : Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, pp.422-423, 1987.
- 5) 日本機械学会編：流れの数値シミュレーション，コロナ社
- 6) 池田裕一：パソコンで解く水理学，丸善，pp.175-191
- 7) 日本機械学会：技術資料 管路・ダクトの流体抵抗，p.18, 1991

(1998. 9.30受付)