

放水路内の段波による立坑の 水位変動現象と段波の抑止方法

A CONTROL METHOD OF SURGING IN DISCHARGE CHANNEL WITH VERTICAL SHAFTS

大谷英夫¹・酒井雅史¹・石野和男²・荒川茂樹³・水向直人⁴

Hideo Ohtani, Masafumi Sakai, Kazuo Ishino, Shigeki Arakawa and Naoto Mizumukai

¹正会員 工修 大成建設株式会社 技術研究所 海洋水理研究室 (〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

²正会員 工博 大成建設株式会社 技術研究所 海洋水理研究室 (〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

³ 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110 東京都台東区東上野 3-3-3)

⁴正会員 東京電力株式会社 柏崎刈羽原子力発電所 (〒945-03 柏崎市青山町 16-46)

A discharge channel of a power station is composed of open channel, tunnel and vertical shafts. Surging phenomenon occurs in the discharge channel when pumps stop all at once. The surging propagates with highly pressurized flow forward the lower narrow channel to make the water spouting from the vertical shafts.

We simulated physically the phenomena in the discharge channel through the laboratory tests and simulated mathematically the water motion by means of the slot model. The laboratory tests, the calculation and the field investigation showed that the phenomenon of surging and spouting water could be depressed by a sophisticated stopping - operation of the pumps.

KEY WORDS : *Discharge channel, surging, vertical shafts, slot model, laboratory tests, numerical analysis, field investigation*

1. はじめに

火力・原子力発電所などの取放水設備の設計においては、ポンプの起動・停止に伴う水路内の水位変動現象を予測し、維持管理用立坑（ピット）等からの溢水が発生しないように検討しなければならない。例えば、取放水路が管路の場合、ポンプの起動・停止時には水路に設置される管理用ピットで水位変動（サージング）が発生する。この現象の数値計算に関しては、土ら¹⁾により現地計測結果を用いて検証されている。

一方、水路が開水路または開水路と管路から構成された場合には、次の現象が発生することが考えられる。ポンプ急停止時には上流から放水口へ伝播する負の段波が発生し、段波の波高が大きいと段波が水路内で反射を繰り返し、水路天端の低い場所では水路が満管状態となることがある。この場所で水路断面が減少すると、段波が突入した際に、減少した水路断面内での段波の波形勾配に起因する非定常効果

と流速の増大が重なり、急激な圧力上昇が生じ、この断面近傍のピットからは水の噴出が発生することが予測される。この現象は水路の設計に係わる要素として興味深い現象と考えられる。このような開水路と管路で構成された水路でのポンプ停止時の水位変動に関してはこれまで研究した例は見当たらない。

そこで、本研究では、まず、実験によりポンプ急停止後に、段波による水の噴出が発生することを確認した。次に、噴出現象を検討するモデルとして、スロットモデル²⁾を導入した非定常開水路流れの基礎式を解く方法を採用し、開水路と管路から構成される水路に対する適用性を検討した。さらに、放水ポンプの流量変化パターンを操作することにより、上述した段波と噴出現象を抑止できることを数値計算により求めるとともに、段波の抑止方法を現地で確認した。

2. 放水停止時の段波の発生・伝播および ピットからの水の噴出現象

(1) 実験方法

実験は、上流から伝播してくる段波によりピットで噴出が発生するように、図-1に示す放水路模型を作成した。すなわち、噴出はピット2で発生するとし、図-1中、A部は段波が伝播できるように開水路、B部とC部は管路、さらに、噴出が顕著に現れるように、B部とC部は下流に向かって漸縮部で接続した。下流端には80×80cmの放水池を設け、堰により水位を調節した。流量は、ピット1の上流側に配置したバルブの開閉により調節し、電磁流速計により計測した。水位は、水路の流下方向に設置した水位計（開水路部）および圧力計（管路部）により計測し、データサンプリング間隔は、0.01秒とした。

実験ケースを表-1に示す。ポンプの停止パターンは、急停止と順次停止の2パターンとした。下流端水位をh=26.5cmとh=28.0cmの2ケース設定し、その影響についても検討した。

表-1 実験ケース

実験ケース	放水池の水位	バルブ操作状況
1	h = 26.5 cm	全開→閉塞
2	h = 28.0 cm (B,C部の初期状態：管路)	全開→閉塞
3	h = 28.0 cm	全開→半閉→閉塞

(2) 数値計算方法

水路内の流れの基礎式は、開水路状態と管路状態を遷移する流れを計算できるようにスロットモデルを用いた次式とした。

連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \tag{2}$$

スロットの幅

$$B_s = \frac{gA_0}{c^2} \tag{3}$$

ただし、B：水面幅もしくはスロット幅 B_s 、Q：流量、t：時刻、A：流積、g：重力加速度、x：流下方向の座標、 S_0 ：水路勾配、 S_f ：摩擦勾配、 A_0 ：管路断面積、c：疎密波の伝播速度である。 S_f は、マンニングの粗度係数により評価した。また、計算では、連続式と運動方程式を4点陰差分法により差分化し、ピットでは連続式(1)のかわりに次式を連続式とした³⁾。

$$A_{si} \frac{dH_i}{dt} = Q_{i-1} - Q_i \tag{4}$$

ただし、 H_i ：ピットiにおける水位、 A_{si} ：ピットiの断面積、 Q_i 、 Q_{i-1} ：ピットiへの流出入流量である。

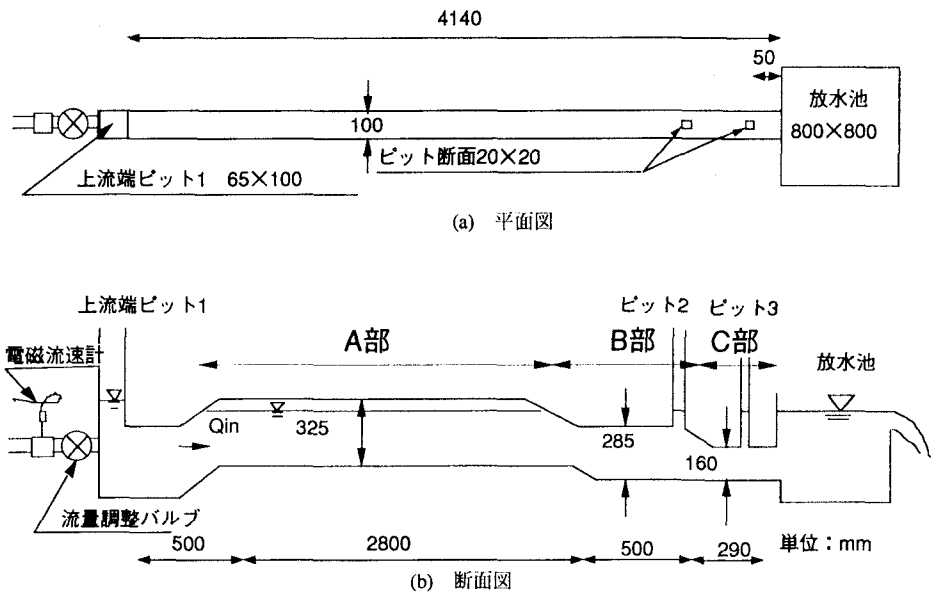


図-1 実験模型図

境界条件は実験で得られたデータ時系列を用いることとし、上流端のピット部で流量データを、下流端で水位データを与えた。管路中の疎密波の伝播速度は、水路の材質（コンクリートの場合）や形状を考慮して、1140m/sとした。

(3) 実験結果および考察

図-2に、ケース2のポンプを急停止した場合の停止直後からの水面形変化を示す。図中には実験値（プロット）および計算値（実線）を併記した。ポンプ停止直後、水路内に負の段波が発生し、上流側の水位は低下し、段波は下流側へ進行する（図-2 (a)）。その段波は、下流端で反射し、上流へ進行して上流端の水位が上昇する（図-2 (b)）。上流端で再反射した段波は波高を増大し、さらに波形勾配を大きくしながら、下流側へ進行し（図-2 (c)）、ピット2に到達した時点でピット2で噴出が発生する（図-2 (d)）ことが明らかとなった。なお、本論分では、ピットの水位が、瞬時に比較的大きな水位差で水路天端を越えた現象を噴出と定義する。段波がB部へ突入したときにピット2から噴出する理由は以下のように示される。式 (5) は、管路流れの基礎式である。

$$-\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right) + \frac{\partial h_l}{\partial x} \tag{5}$$

ただし、 p ：圧力、 v ：流速、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 α ：エネルギー補正係数、 x ：流下方向の距離、 t ：時刻、 h_l ：損失水頭である。段波が、B部の入口に到達するとB部およびC部の圧力が段波の波形に従い上昇する。B部が開水路から管路状態へ変化した瞬間、擾乱が疎密波の伝播速度で伝わるため、式 (5) の非定常項が急激に大きくなる。この非定常効果に、B部とC部間の漸縮部による速度水頭項が大きくなる効果が加わって、C部の圧力勾配線が大きく立ち上がり、流れ方向の圧力分布はB部とC部の接続点をピークとする三角形分布となる。この時、B部とC部の接続点に位置するピット2で噴出が発生すると考えられる。図-3にポンプ急停止時のピット2における水位変化を示す。静穏時の放水池水位を基準水位とした。ケース1は、正の段波の頂部でのみピット2近傍の水路が管路状態になるため、ケース2に比べ噴出の程度が小さく、段波突入後にB、C部で完全な管路状態となることが大きな噴出の発生に必要であることがわかる。

スロットモデルを用いた計算は段波の伝播の様子を良好に再現できる。しかし、ピット2での噴出の高さが過大であること、上流端で再反射した段波の

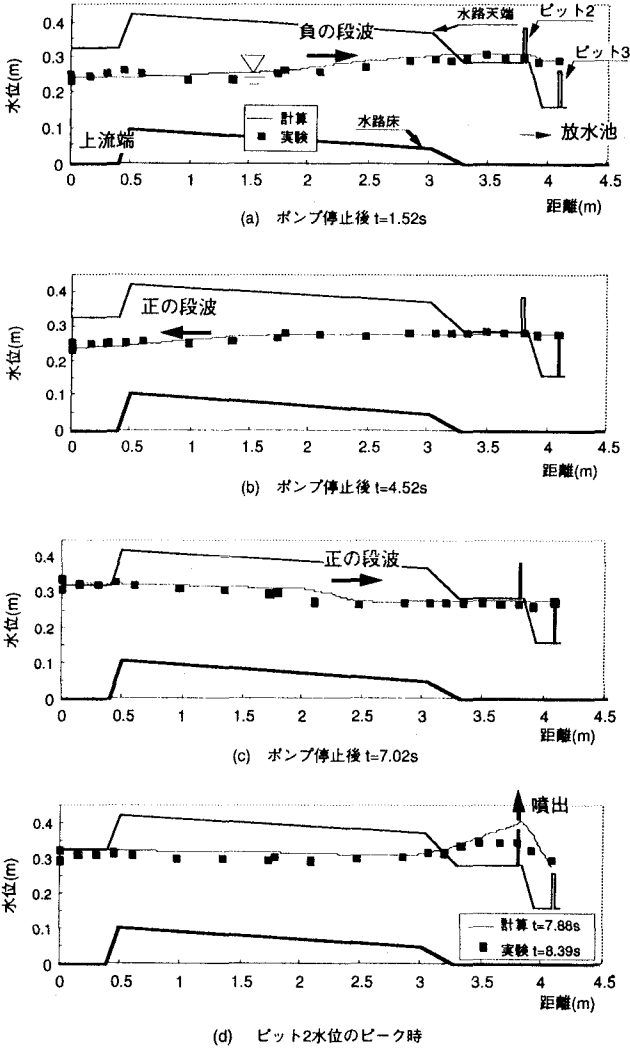


図-2 ポンプ停止後の水面変化

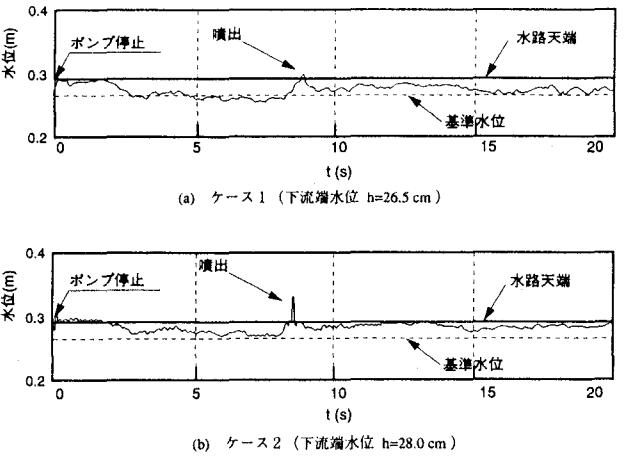


図-3 ポンプ急停止時の水位時系列（ピット2）

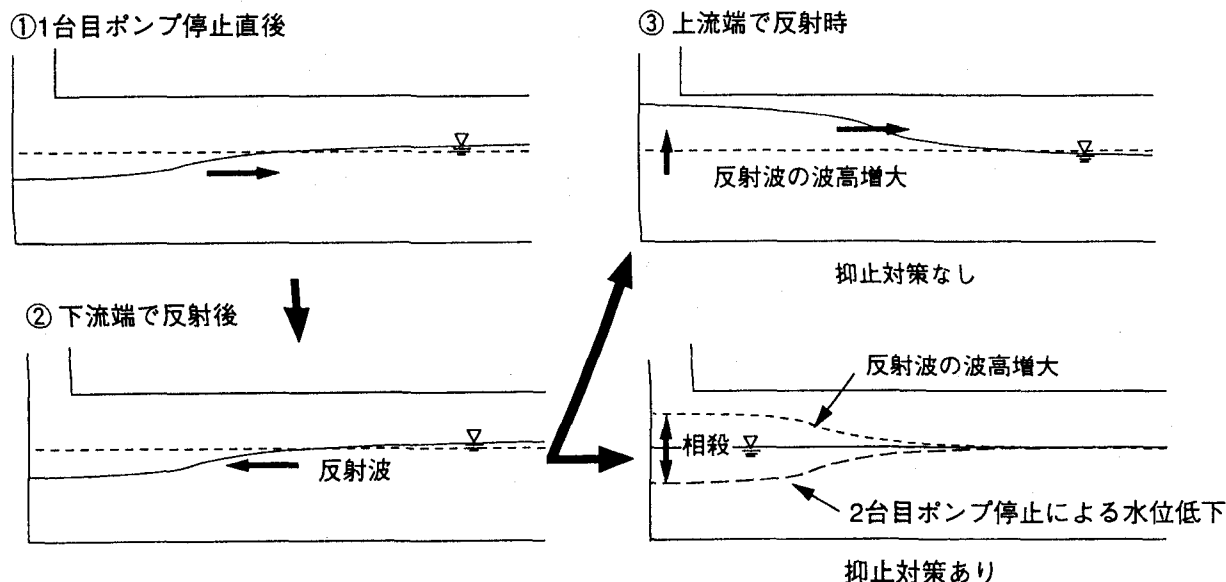


図-4 ポンプ停止による反射波の抑止方法

3. 噴出抑止（段波の消滅）に関する検討

(1) 段波の相殺方法

水の噴出を防止するには、噴出が発生するピットに接近する段波の波高を小さくすればよい。そのためには、放水路の上流端のピット水位が、下流端から戻ってくる段波の再反射時に大きく上昇しなければよい。この条件を考慮した下流側のピット部での水の噴出抑止方法（段波の相殺方法）を図-4に示す。実際の放水路のポンプ停止方法を参考に、数台のポンプをある時間間隔で順次停止する設定とした。

1台目のポンプ停止時に発生した段波が水路を往復し、上流端で反射する時刻に、2台目のポンプを停止する。上流端で反射する段波は水位を増大させるが、2台目のポンプ停止時に負の段波が発生するため、水位上昇が相殺される。この操作で上流端のピット水位の急激な上昇を抑え、下流側のピット部に伝播する段波を消し、下流のピットから噴出させない方法を考えた。図-5に抑止対策をとった場合（実験ケース3）のピット2での水位変化を示す。図-3に見られたピット2での顕著な水位変動はなくなり、水の噴出が抑止できたことを確認できた。

図-6、図-7は、図-1の放水路模型を水平方向に100倍、鉛直方向に20倍に拡大して、実機と同オーダーのスケールで、噴出抑止方法に関して計算で検討した結果である。この計算では、ポンプ3台で放水し、これら3台のポンプを順次停止した。噴出抑止対策なしのケースのポンプ停止時刻は1台目の停止後、2台

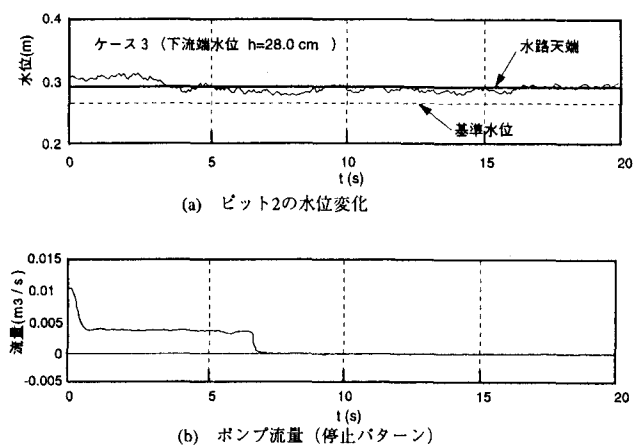


図-5 ポンプ段階停止時の水位時系列（ピット2）

位相は計算の方が早い（図-2 (c)）ことが実験と異なっている。この理由としては、次のことが考えられる。実験では水路長に比べ水深が深く、段波が完全な長波ではないため、段波が上流端で反射するときに短周期波に分裂し、波速が小さくなる。したがって、下流へ進行する流量が計算より小さくなる。また、ピット内の噴出水位については、計算ではピット内の水の鉛直方向の運動を考慮していないため、その速度水頭およびエネルギー損失水頭分大きな値となっていることも一因である。しかしながら、この計算モデルは水の噴出現象およびその原因となる段波の伝播が再現できるため、水の噴出現象を抑止する方法を検討するツールとして使用できることが確認できた。

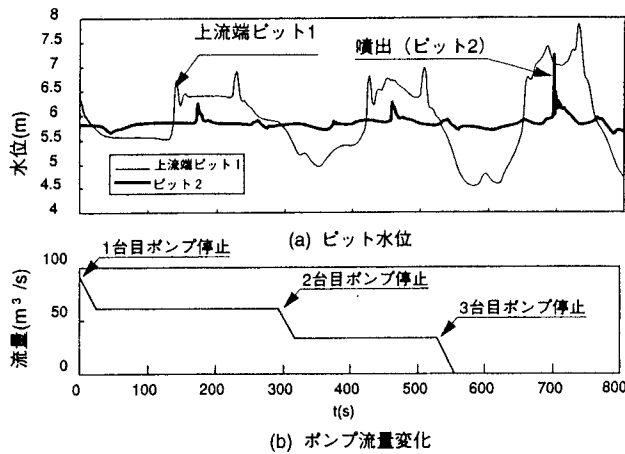


図-6 噴出抑止対策なしの計算結果
(図-1の現地換算モデル)

目が290秒、3台目が530秒とした。また、噴出抑止対策ありのケースは、段波の波速を考慮し、ポンプ停止時刻を2台目が120秒、3台目が230秒とした。また、下流端水位は一定として与えた。

図-6は噴出抑止対策なしの計算ケースで、ピット2で鋭いピークが発生した。いずれのピークも上流端で段波が反射後、下流へ伝播し、段波が天端の低い断面に進行し、管路状態になって圧力を伝え、近傍のピット2において水が噴出したことを示している。ピット2の噴出の大きさは上流側ピット1での水位変動の大きさに対応しており、特に第3波目で顕著なピークが発生している。図-7は噴出抑止対策ありの結果で、図-6でいう上流端ピットの第1波、第2波は消え、ピット2の噴出が抑止できた。

(2) 段波相殺方法の現地検証

図-4で示した方法により段波を消滅できることを建設中の発電所放水路を用いて確認した。対象とした放水路は、全長約415m、水路断面は、約5.9×6.5mの矩形断面である(図-8)。流量は、ポンプ1台当たり約30m³/sで、3台用いて総流量90m³/sである。段波は、ポンプを急停止することにより発生させた。水路は地下に設置されており水位変動を目視できな

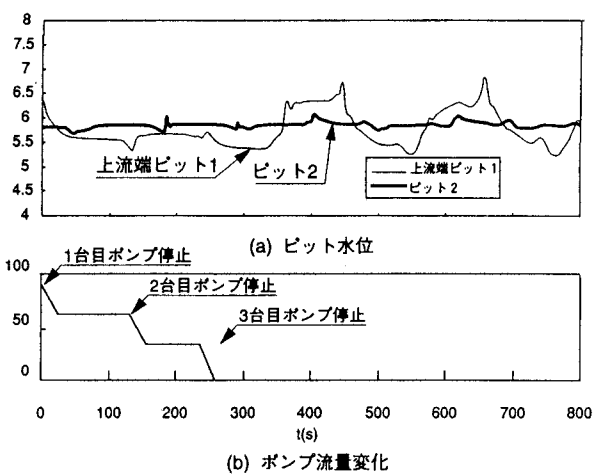


図-7 噴出抑止対策ありの計算結果
(図-1の現地換算モデル)

いため、段波の発生は、上流端のピット水位の変動および水路に設置してある管理用ピットからの空気の流れにより判断した。図-9は、抑止対策をとる前の上流端ピットの水位変動である。1台目のポンプを停止すると、段波発生と同時に上流端ピットの水位が大きく低下し、約140秒後には水位が再び上昇し、下流側で反射した段波が上流端ピットに戻ったことがわかる。この後、正の段波の下流への伝播により下流側のピット2、ピット3からは、段波の伝播を示す空気の流れが観測された。また、3台目のポンプを停止した後の上流端ピットの水位上昇は、このとき既に放水路中の流速が小さくなっているため、段波自体の波高が増幅したことを示している。図-10は、抑止対策として上流端に段波が到着した時刻に合わせて2台目以降のポンプを停止した場合の上流端ピットの水位変動である。2台目、3台目のポンプの停止により上流端ピットの水位上昇が抑制されたことがわかる。また、3台目のポンプを停止した後の上流端ピットの水位上昇も図-9に比べ小さくなっている。このとき、下流側のピットからは、段波の接近を示す空気の流れがほとんどなかったことから、段波の消滅が確認できた。

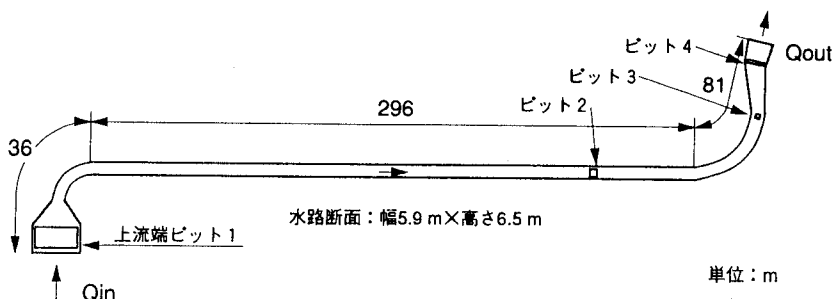


図-8 実機放水路

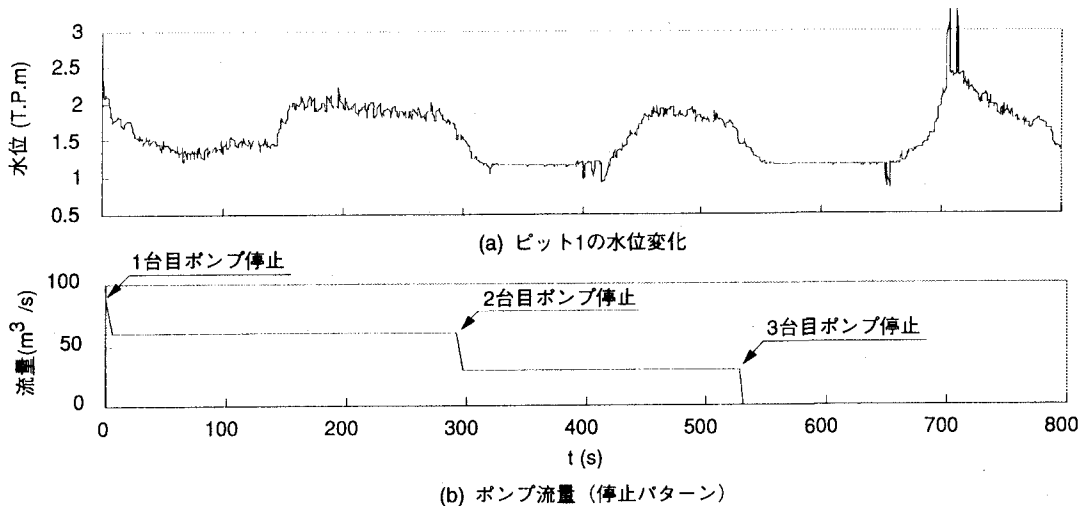


図-9 上流端ピット1の水位時系列 (抑止対策なし)

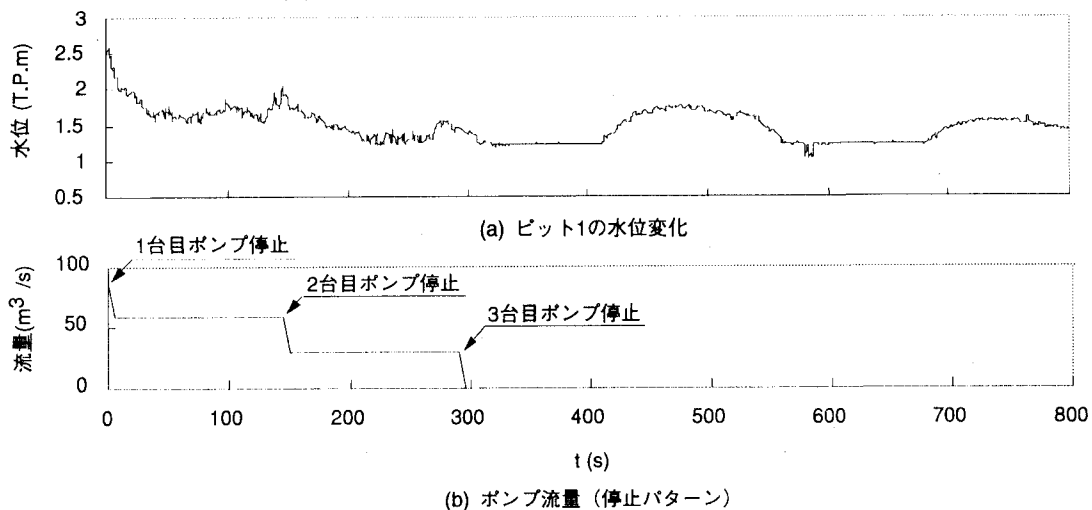


図-10 上流端ピット1の水位時系列 (抑止対策あり)

4. まとめ

本研究の主な結論を以下に列挙する。

- (1) ポンプ停止時に発生する段波により、放水路下流の狭断面部ピットから水が噴出することを実験により確認した。また、ポンプ停止のタイミングにより、段波を相殺できることを示した。
- (2) ポンプ停止時に発生する水の噴出メカニズムを実験により確認した。水の噴出は、ポンプ停止時に、水路の上流で発生する負の段波が放水路内を往復した後、上流端で正の段波となり、この正の段波が下流側の狭断面区間へ突入し、水路が完全な管路状態となり、ピット部での急激な圧力上昇を引き起こしたことが原因である。
- (3) 実験との比較により、スロットモデルを用いた数値計算方法の適用性を示した。この計算方法では、ポンプ停止後に発生する水路内の段波の発生伝播を良好に再現できる。また、ピットからの水の噴出も

計算できる。しかしながら、ピット内の水の水頭および損失水頭を考慮していないため、噴出による水位上昇は実験と比べ過大となる。

- (4) 1台目のポンプ停止時に発生した段波が水路を往復し、上流端で反射する瞬間に、2台目のポンプを停止すると段波は相殺する。これは、上流端で反射する段波は水位を増大させるが、2台目のポンプ停止時に負の段波が発生するためである。

参考文献

- 1) 土宏之, 長藤哲夫, 石野和男: 冷却取水ポンプの起動・停止時に放水路で発生するサージングの現地観測と数値計算について, 第43回年次学術講演会概要集, pp.478-479, 1988.
- 2) Chaudhry, M.H.: Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, pp.422-423, 1987.
- 3) 鮎川登, 栗崎夏代子, 富田強, 大淵真志: 地下放水路の管路状態の非定常流の数値計算, 土木学会論文集 No.545/Ⅱ-36, pp.55-67, 1996. (1997.9.30 受付)