

逆止弁によるポンプ急停止時の水撃圧抑制対策について

Countermeasure of Water hammer after Pump Power Failure Using Check Valve

奈良大和* 稲垣仁根** 斎藤正樹*

YamatoNara*, Hitone Inagaki**, Masaki Saito*

1 はじめに

著者らは、ポンプ送水系パイプラインにおいて、水柱分離の発生地点と水柱分離が管路に及ぼす影響を把握できれば、水柱分離を許容した設計が可能になると考え、その可能性を数理モデルを用いた水撃圧解析により検討を行っている。¹⁾

本報では、水柱分離を許容するのを前提として積極的にポンプトリップ時の水撃圧を抑制するために、逆止弁を管路の途中に設置する方法を提案し、その有効性を水撃圧解析により確認したので報告する。

2 従来のパイプラインの設計方法と課題点

従来のポンプ送水系パイプラインの設計では、ポンプトリップ時に発生する負圧により水柱分離が発生した場合、分離した水柱が管路端での反射波により再結合し、その時に発生する高圧力が管路を破壊する可能性があると考えていた。そのためフライホイールなどの負圧対策施設を導入し、発生する負圧を 7m 以下に抑えて²⁾、水柱分離を発生させないことを前提とした設計を行ってきた。

著者らは、管路の設計では水柱分離の発生はできるかぎり避けるべきであるとの立場を堅持するものではあるが、使用頻度の非常に少ないこれらの負圧対策施設に多大の施工費と管理費用及び保守労力を投入するのは、管理者にとって負荷が大きすぎると考えていた。

3 特性曲線法に基づく差分方程式

$$V_{Pi} = \frac{1}{2} \left[(V_{i-1} + V_{i+1}) + \frac{g}{a} (H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{f}{2D} (V_{i-1}/V_{i-1} + V_{i+1}/V_{i+1}) \right] \quad \text{-----}(1)$$

$$H_{Pi} = \frac{1}{2} \left[(H_{i-1} + H_{i+1}) + \frac{a}{g} (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{a f}{g 2D} (V_{i-1}/V_{i-1} - V_{i+1}/V_{i+1}) \right] \quad \text{-----}(2)$$

ここで、 a : 圧力波の伝播速度、 f : ダルシーワイスバッハの係数、 D : 口径、 t : 時間刻み

管路の運動方程式と連続方程式を線形結合し 2 組の常微分方程式に変換し、さらに規定時間間隔による差分方程式に変換する。任意地点の流速 V_{Pi} と圧力 H_{Pi} は式(1)、(2)により求められる。

4 水柱分離の数理モデル

水柱分離の発生と消滅について、以下に示すような数値モデルを採用した。¹⁾

管路内の格子点での圧力水頭 H_{pc} を(1)式により計算する。

計算した圧力水頭 H_{pc} が蒸気圧 H_{vc} (水温 20 : - 10m) 以下であれば、この格子点で水柱分離が発生したと判断し、空洞の長さをゼロに初期化し、圧力は蒸気圧に固定する。

空洞が管の全断面を占めていると仮定し、空洞の長さを空洞の存在する区域の両端の流速差を水柱分離発生時刻から積分して求める。

$$LC = \{V_{P1} - V_{P2}\} t \quad \text{-----}(3)$$

空洞の両端の流速は 1 が下流端、2 が上流端と考え、(4)、(5)式で与えられる。

$$V_{P1} = C_3 - C_4 H_{Pi} \quad \text{-----}(4)$$

$$V_{P2} = C_1 + C_2 H_{Pi} \quad \text{-----}(5)$$

$$C_1 = V_2 - \frac{g}{a} H_2 - \frac{f}{2D} V_2 / V_2 \quad C_2 = \frac{g}{a}$$

$$C_3 = V_1 + \frac{g}{a} H_1 - \frac{f}{2D} V_1 / V_1 \quad C_4 = - \frac{g}{a}$$

空洞の長さがマイナスになった場合には、二つの水柱が衝突したことによる圧力上昇を求める。この後、通常の計算に戻る。

*クラウンエンジニアリング(株) Crown Engineering Co., Ltd. キーワード: パイプライン, 負圧,

**宮崎大学農学部 Faculty of Agriculture, Miyazaki University ポンプトリップ, 逆止弁

5 水柱分離を考慮しない場合の過渡現象

設計基準ポンプ場に記載されているポンプトリップ時のウォーターハンマーの計算例，ワンウエイサージタンク・圧力水槽の計算例³⁾を検討対象とし，シミュレーションによる再現を行った．ポンプとパイプラインの緒元を表-1に，検討ケースと負圧対策施設の組み合わせを表-2に示す．また，管路の縦断図とケースA～Dの最大・最小圧力標高を図-1に示す．

表-1 ポンプ及び管路の緒元

ポンプ		慣性モーメント		ポンプ段数
ポンプ台数	定格回転数 RPM	ポンプ+電動機 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	フライホイール $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	
2	730	176	841	1
効率100%時		水面標高		
流量 m^3/min	吐出圧 m	出力 KW	吐水槽 EL.m	ポンプ吸水槽 EL.m
60	48	564	60	25
エアチャンバ		ワンウエイサージタンク		
初期空気量 m^3	ノズルの口径 m	ポンプからの位置 m	管路上のタンク 水面の高さ m	タンクの 直径 m
33.6	0.35	350	2.5	1.8
管の内径 m	管路延長 m	ダルシーワイス パッハの係数	管厚 mm	管材のヤング係数 $\times 10^{10} \text{kgf}/\text{m}^2$
12	1000	0.098	12	2.1

表-2 解析ケースと負圧対策施設

ケース	無対策	負圧対策				水柱分離 考慮する
		フライホイール	ワンウエイサージタンク	エアチャンバ	逆止弁	
A						x
B						x
C						x
D						x
E						
F						

無対策の場合：水柱分離がないものと仮定して計算した結果に，後から管路縦断を当てはめたため管路全体に大きな負圧が生じている．

フライホイールの場合：管路全般に負圧は生じるが，水柱分離の発生は避けることができる．電動機の起動出力が増加し，運転費が高む．

ワンウエイサージタンク・エアチャンバの場合：下流区間で大きな負圧を生じる可能性が高く，水柱分離の発生を完全に抑制するためには，さらに対策の規模を大きくする必要がある．

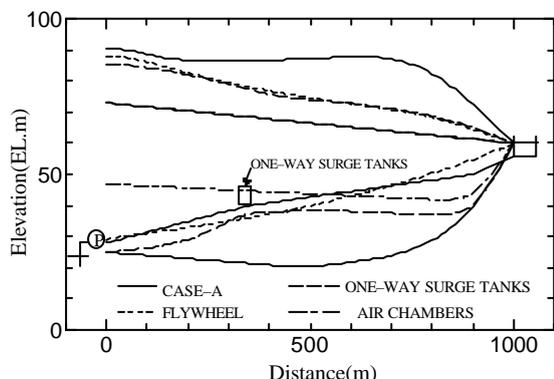


図-1 最大最小圧力標高縦断図(ケースA～D)
Fig.1 Profiles of maximum and minimum pressure head along the pipelines (CASE-A ~ D)

6 水柱分離を考慮した場合の過渡現象

無対策で水柱分離を考慮したケースEの最大・最小圧力標高を図-2に示す．ポンプトリップによる負圧発生により水柱分離とその後の水柱の再結合が発生しても，必ずしも管体の破壊に至るような大きな圧力上昇を生じない可能性がある．水柱分離を考慮することにより負圧の抑制が可能になるが，圧力の上昇は負圧対策を行った場合より若干大きくなる傾向にある．

7 逆止弁を設置した場合の過渡現象

圧力上昇を抑えるために，吐水槽から100mの地点に逆止弁を設置する対策を検討し，最大・最小圧力標高を図-2に示す．逆流が始まると逆止弁が閉鎖するとして，逆止弁地点の流速をゼロに設定し，逆止弁下流側の圧力が上流側より大きくなるときは弁が開くものとした．

ポンプトリップ後，水位は下降を始め，下降が吐水槽地点まで到達した後，逆流を始めると逆止弁が閉鎖する．そのため，ポンプ地点での反射波が発生しないため，圧力上昇は逆止弁と吐水槽間の一部に限られる結果となる．負圧の状況はケースEと同じであるが，圧力上昇はほぼ定常水位程度に抑えられており，管路のコスト削減に有効であると考えられる．

本検討では理想的な逆止弁を想定しているが，他に急閉式や緩閉式などの種々の方式があり，その機能を検証する必要がある．

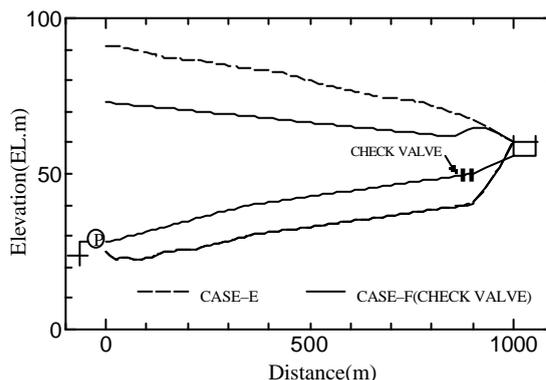


図-2 最大最小圧力標高縦断図(ケースE, F)
Fig.2 Profiles of maximum and minimum pressure head along the pipelines (CASE-E, F)

参考文献

- 1) 稲垣，奈良，斎藤，ポンプ送水系パイプラインにおける水柱分離について(2002)，第10回日本雨水資源化システム学会，p78-81
- 2) 農林水産省構造改善局(1981)，水管理制御方式技術指針(バルブ編)，p39
- 3) 農林水産省構造改善局(1982)，土地改良事業計画設計基準 設計ポンプ場，p156-159，312-316