

## CIP・SMAC法を用いた管水路水撃圧解析手法の開発

Development of water hammer analysis in pipelines with CIP and SMAC method

○ 安瀬地一作\*, 木村匡臣\*\*, 中矢哲郎\*, 桐博英\*

○ AZECHI Issaku, KIMURA Masaomi, NAKAYA Tetsuo, KIRI Hirohide

### 1. はじめに

パイプラインシステムは、通常、地中に埋設されているため、保守・点検・修理等の維持管理においては開水路に比べ費用、労力共に管理者にとって大きな負担となっている。とりわけ、農業用パイプラインシステムの漏水調査および修理においては、上水道に比べて空気弁や制水弁等の附帯施設や流量計、圧力計などの計測機器、またその遠隔監視システムがあまり整備されていないために、その負担はより大きいものとなっている。

管路の漏水原因のひとつに水撃圧があり、瞬間的に発生する過大または過小な圧力により管が破損する場合と、水撃圧が繰り返し加えられることによる疲労破壊が考えられる。そのため、漏水原因や漏水箇所の推定には、パイプラインシステム全体にかかる水撃圧の大きさや頻度などを把握しておくことが重要である。しかし、前述のように農業用パイプラインシステムには水撃圧を常時監視するようなシステムはあまり整備されていないため、実際の水撃圧を把握することは困難である。現場の情報不足を補うためには、水撃圧の数値解析が有効となる。そのためには、水撃圧を精度よく長時間のシミュレーションを効率的に行える手法が求められる。管路内の水撃圧の伝播速度は、鋼管で約 1000m/s、硬質塩化ビニル管で 300m/s 程度と大きいため、陽解法では時間ステップに大きな制約がかかり、大規模なパイプラインシステムでは膨大な計算時間が必要となる。一方、時間刻みの制約を大幅に緩和できる陰解法では、移流項の差分の高次精度化が困難であるという問題点もある。そこで、本研究では、管路の弾性体方程式の解法において、CIP法とSMAC法を組み合わせることで、高次精度かつ時間刻みの制約の小さい解析法を開発した。

### 2. 基礎方程式

摩擦損失にマンニング式を用いた管水路の運動方程式と、水の圧縮性と管の弾性変形を考慮した連続式は、(1)、(2)式で表される。

【運動方程式】

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \left( g \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} + f_i \frac{v |v|}{2} \right) \quad (1)$$

【連続式】

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - v \sin \theta \quad (2)$$

ここで、 $v$  : 管内平均流速(m/s)、 $H$  : 基準位に対するピエゾ水頭(m)、 $R$  : 径深(m)、 $n$  : マニング粗度係数(m<sup>-1/3</sup>s)、 $f_i$  : 局所損失係数、 $g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)、 $a$  : 圧力伝播速度(m/s)、 $\theta$  : 基準線に対する管路の傾きである。

### 3. 解析手法

CIP法は、移流段階と非移流段階に分離する分離解法の一つで、移流段階において2点間のプロフィールを3次多項式で表し、移流方程式の1階空間微分と連立することで3次精度が構築できるスキームである。移流段階ではセミラグランジュ解法であるため、移流場がほとんど変化しない場合には時間刻みの制約はないという利点があるが、非移流段階の解法によっては制約が課されることとなる。一方、SMAC法を含むMAC型の解法では、圧力項((1)、(2)式の右辺第一項)を陰的に扱うため、流速に比べて圧力の伝播速度が大きい管路流れに対しては時間の制約を緩和することが期待できる。さらに、SMAC法は、流速の予測値を導入することで移流段階と分離して扱うことが可能であるため、CIP法との組み合わせが容易である。ここでは、移流相ではCIP法を、非移流相ではSMAC法を用い、高次精度で高効率の解析手法を提案する。(1)、(2)式ともに以下のように移流段階と非移流段階に分離する。

\* 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所 National Institute for Rural Engineering, NARO

\*\* 東京大学大学院農学生命科学研究科 The University of Tokyo, Graduate School of Agriculture and life science

Key Word 水撃圧, CIP法, SMAC法

【移流段階】

$$(1) \rightarrow \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)'$$

$$(2) \rightarrow \frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2)'$$

【非移流段階】

$$(1)'' \rightarrow \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \left( g \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} + f_i \frac{v |v|}{2} \right) \quad (1)''$$

$$(2)'' \rightarrow \frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - v \sin \theta \quad (2)''$$

(1)', (2)'は CIP 法により時間発展させる. 非移流段階においては, 移流段階で得られた流速・水頭をそれぞれ $v^*$ ,  $H^*$ とし, (1)''の右辺第二項をそれぞれ $G$ , 予測値を $v^{**}$ とすると, (1)'', (2)''はそれぞれ(3), (4), (5)となる.

$$(1)'' \rightarrow \frac{v_i^{n+1} - v_i^{**}}{\Delta t} = -g \frac{\partial H^{n+1}}{\partial x} + G^* \quad (3)$$

$$(1)'' \rightarrow \frac{v_i^{**} - v_i^*}{\Delta t} = -g \frac{\partial H^*}{\partial x} + G^* \quad (4)$$

$$(2)'' \rightarrow \frac{H_i^{n+1} - H_i^*}{\Delta t} = -\frac{a^2}{g} \frac{\partial v^{n+1}}{\partial x} - v^{n+1} \sin \theta \quad (5)$$

(3)から(4)式を差し引いて, 圧力補正量 $\delta H = H_i^{n+1} - H_i^*$ とすると圧力補正量に関する方程式が得られる((6), (7)式)

$$v_i^{n+1} = v_i^{**} - g \frac{\partial \delta H}{\partial x} \Delta t \quad (6)$$

$$\frac{\delta H_i}{\Delta t} = -\frac{a^2}{g} \frac{\partial v^{n+1}}{\partial x} - v^{n+1} \sin \theta \quad (7)$$

(4), (6), (7)式より $\delta H$ ,  $v^{n+1}$ を求める. (3), (5)式は陰的な形式となっているため, 時間刻みに対する制約が緩和される. 水撃圧現象では, 流速に比して圧力伝播速度が著しく大きいため, 非移流段階で陰的に計算できることは非常に大きなメリットである.

4. 解析結果

解析手法の妥当性の検討のため, 1次風上差分法と非移流段階で通常の方法を用いた Normal\_CIP 法と, SMAC\_CIP 法でシミュレーション結果を比較した. 計算条件は, 上流水位: 10m, 下流水位: 0m,  $\phi$  1000mm の鋼管で圧力伝播速度は約 1000m/s, マニング粗度係数=0.001, 管内流速約 2m/s, 全長 3000m で定常に達した状態から, 上流から 2800m 地点に設置したバタフライバルブを 600 秒で閉鎖する条件である. 同一時間刻みの場合, SMAC\_CIP

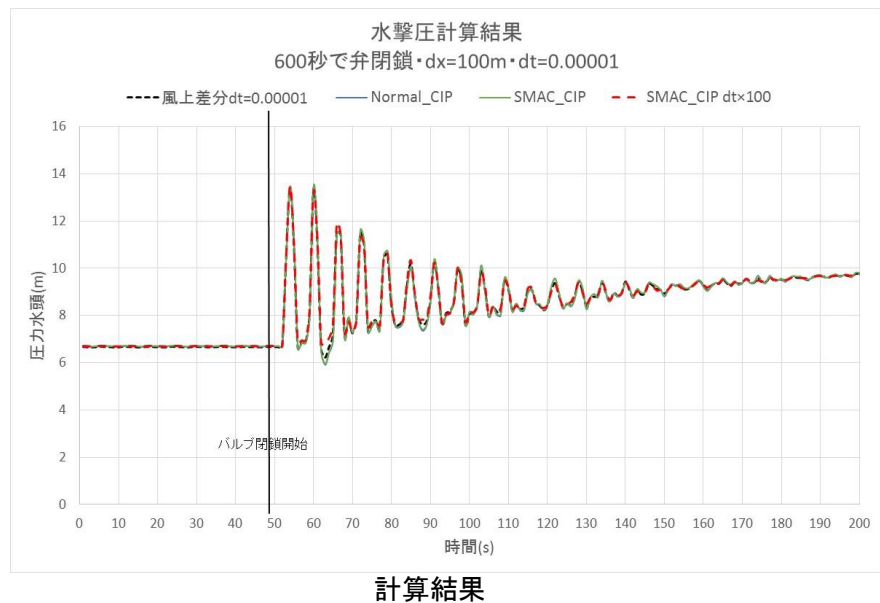


Fig.1 Numerical calculation result

法は, Normal\_CIP 法と同じ結果が得られた. 1次風上差分では CIP 法と若干の乖離が見られる. 時間刻み dt を 100 倍の dt=0.001 とした SMAC\_CIP の場合も, 若干の乖離が見られるが, 1次風上差分と同程度であり, 安定的に計算できている. なお, SMAC\_CIP 法では dt=0.1 まで安定的に解析可能であったが, 圧力波の減衰が早い結果となった. したがって, 水撃圧解析を行う際には, dt のとり方に注意が必要であるが, 定常のみを求める場合などには大幅に計算時間を節約できる.

謝辞

本研究は, 総合科学技術会議の SIP(戦略的イノベーションプログラム「基幹的農業水利施設の戦略的なアセットマネジメント技術の開発」(管理邦人 J S T) の支援によって実施された. ここに謝意を表します.