

高精度かつ拡張性の優れた水撃圧解析手法に関する研究

Study of water hammer analysis method which has high-precise and better managerial expansibility

田中良和、向井章恵、樽屋啓之

TANAKA Yoshikazu, MUKAI Akie, TARUYA Hiroyuki

はじめに

水撃圧解析手法には特性曲線法が有効である。特性曲線法では時空間座標において特性曲線が格子点上を通過する場合は精度が良いため、解析時間の時間ステップの調節が必要であった。しかし、複数の異径管が接続された配管では、適切な時間ステップを設定することは容易ではなく、一般的には格子点間を線型補間するため、精度が悪くなっていた。また、複数の種類の水利構造物が接続されたパイプラインシステムを解析するプログラムコードは、従来の構造化プログラミング言語では、水利構造物の種類数に比例してサブルーチン内の条件分岐が増え、コードが長く複雑になり、拡張性やメンテナンス性が悪かった。本研究では、時間ステップを調節することなく高精度に、また、既存のコードを変更することなく新たな種類の水利構造物のコードを追加できる水撃圧解析手法を提案する。

概要

特性曲線法の解法において特性曲線が格子点を通過しない場合を想定し、格子点間を CIP 法によってエルミート補間して圧力と流速を高精度に求めた。また、パイプラインシステムを線と点のネットワーク構造と考え、オブジェクト指向プログラミング言語による継承の機能を用いて、線を管、点を水利構造物として別々のコードとすることによって既存のコードに触れることなく差分修正コードの追加を可能にした。

農村工学研究所

National Institute for Rural Engineering

特性曲線法

支配方程式は以下の通りである。

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} = 0$$

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \sin \alpha \right) = 0$$

ここで、 H : 圧力、 V : 管内平均流速、 t : 時間、 x : 管路延長、 D : 管径、 f : 摩擦損失係数、 a : 圧力波の伝播速度、 α : 管軸の勾配、 g : 重力加速度である。特性曲線法は、支配方程式を座標変換することによって双曲型微分方程式に変換し、前進波と後退波を重ね合わせて水撃圧現象を解析する手法である。

CIP法

CIP 法とはコンピュータグラフィックスでも曲線描画手法として用いられるエルミート補間を仮想粒子の移流現象に適用した手法である。エルミート補間は、2 点における値と空間微分値を用いて 2 点間を 3 次精度曲線で補間する。補間式は以下の通りである。

$$F_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d$$

$$a_i = \frac{g_i + g_{iup}}{D^2} + \frac{2(f_i - f_{iup})}{D^3}$$

$$b_i = \frac{-3(f_i - f_{iup})}{D^2} - \frac{2g_i + g_{iup}}{D}$$

$$c_i = g_i$$

$$d_i = f_i$$

ここで、下付文字 i : 補間位置、下付文字 iup : 移流源点の上流側格子位置、 f : 格子点物理量、 g : f の空間微分、 D : 格子間距離である。

キーワード: 特性曲線法、CIP 法、オブジェクト指向、水撃圧

オブジェクト指向プログラミング

オブジェクト指向プログラミング言語とは、構造化プログラミング言語が整数型や浮動小数点型のような言語設計者が定義した型に基づく値を計算していたのに対し、プログラマーが新たに線、点、管、および水利構造物の型（クラス）を定義し、それらの型に基づく実体（オブジェクト）をメモリー上に生成し、その実体に対して型で定義された関数を呼び出すことによって、計算を進める手法である。

パイプラインシステムのネットワーク構造を構成する線と点の型は、接続関係や位置を属性として、ネットワークを構築する関数を定義した。さらに、線には CIP 法を用いた特性曲線法による水撃圧解析アルゴリズムが関数として定義し、点にはその境界条件の処理アルゴリズムが定義した。複数の種類の管と水利構造物の型は、線と点の型の定義を継承して、それぞれの形状や水理機能を表す関数を追加定義した。

よって、ネットワークの上流側の管から下流側の管へ順にこれらの関数を呼び出すことにより、ネットワークに接続された管と水理構造物の水撃圧を解析する。コードの中にはネットワークに存在する異種類の水利構造物による条件分岐は無く、水利構造物の実体が型で定義された関数を自動的に選択し、実行する仕組みである。

解析例

Fig.1 に示す簡単な管路について、CIP 法と線形補間法を用いた特性曲線法の計算結果の比較を行った。特性曲線が格子上を通過する時間ステップは0.236sである。Fig.2 の線形補間の結果では、時間ステップが小さくなるにつれて水撃圧の最大値が小さくなり、時間経過が長くなると、数値粘性の影響が大きかったのに対し、Fig.3 の CIP 法による結果では、水撃圧の最大値と長時間が過ぎた値は時間ステップにあま

り依存せずに高い精度を保った。

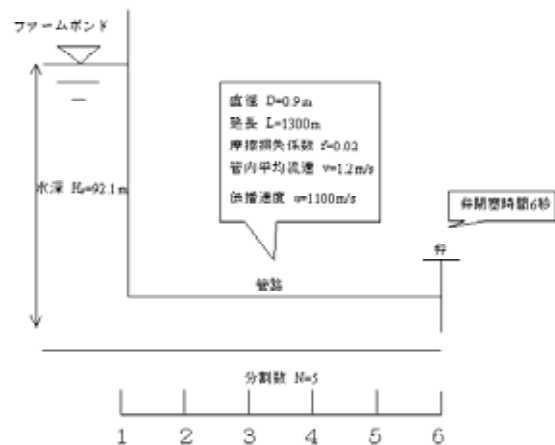


Fig.1 簡単な管路の解析条件
Analysis condition of simple pipeline

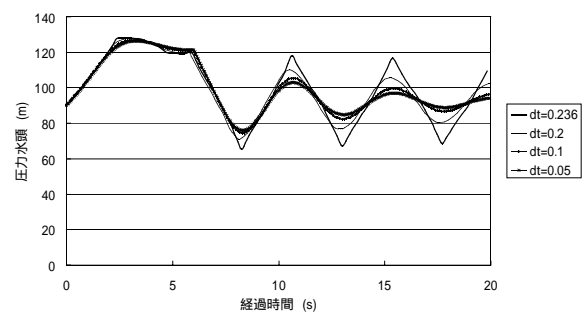


Fig.2 末端弁における圧力水頭の変化
(線型補間を用いた特性曲線法の場合)
Change of pressure head at end valve
(Case using linear interpolation)

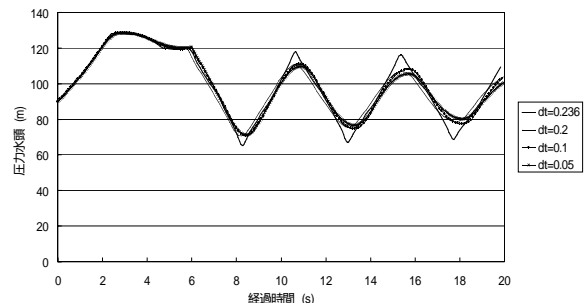


Fig.3 末端弁における圧力水頭の変化
(CIP法を用いた特性曲線法の場合)
Change of pressure head at end valve
(Case using CIP method)