

粒子法を用いた伏越し部の流速分布解析

中日本建設コンサルタント株式会社 ○石井 康浩
中根 進

1. はじめに

流体の数値シミュレーション手法として差分法や有限要素法がある。しかし、差分法では3次元に拡張した場合でも、水面変動を解析することは困難である。

水面変動を伴う流体を解析することができる手法として、1995年に東京大学の越塚氏が開発した粒子法¹⁾があり、文献²⁾に粒子法の二次元水柱崩壊（ダム崩壊）問題を扱うソースコード（C言語）とこれをコンパイルしたプログラムが提供されている。

本報告では粒子法の基礎研究として粒子配置データを習作し、伏越し部を洗浄水でフラッシュした際の流速分布を解析した事例を紹介する。

2. 粒子法（MPS）の概要²⁾

粒子法は連続体を有限の粒子で表現し、連続体の挙動を粒子の運動により解析する。

なお、流体の非圧縮性流れは、連続の式とナビエ・ストークスの方程式により以下のとおり表現する。

- 1) 質量保存則 ⇔ 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

- 2) 運動量保存則 ⇔ ナビエ・ストークスの方程式(非線形偏微分方程式)

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

越塚氏は式中の微分項を「粒子間相互作用」に置き換え、微分方程式を四則演算に変換することで、流体運動をシミュレーションできるようにしている。

3. 伏越し部におけるフラッシュ流速の解析

(1) 伏越し部の解析モデル

伏越し部の解析モデルは、以下に示す2タイプで作成しており、今回の解析ケースでは二次元水柱崩壊（ダム崩壊）問題のプログラム²⁾を改変することなく使用可能である。

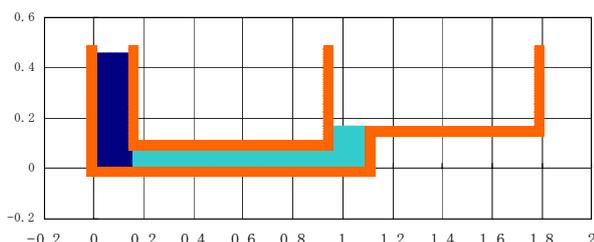


図-1 従来型伏越し解析モデル

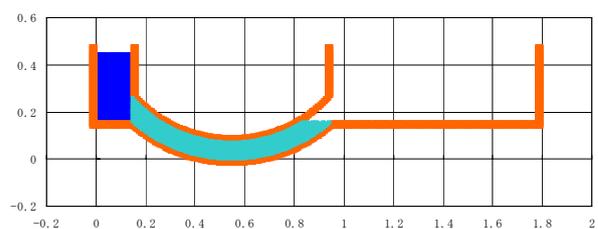


図-2 円弧型伏越し解析モデル

(2) 伏越し水理モデルの条件

今回の解析で使用したプログラムでは、伏越しの上下流は貯留槽に設定している。

そのため、下流側の貯留槽では、シミュレーション時間内で洗浄水が逆流しないよう、貯留槽断面（距離）を長めにとっている。

【伏越し部の構造寸法】	
● 伏越し管径	=72mm
● 伏越し部延長	=0.808m
● フラッシュ時水位差	=0.288m
● フラッシュ水量	= $0.144 \times 0.288 = 0.041\text{m}^3$

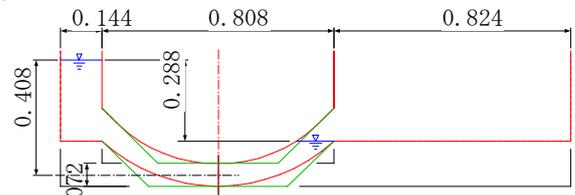


図-3 伏越し解析モデルの諸元

(3) 粒子法の計算条件

粒子法で使用するパラメータについて、現時点では基礎研究の段階のため、文献²⁾で記載されている数値をそのまま利用する。

【主な計算条件】	
● 粒子径 r_0	=0.008m
● 初期粒子間距離 l_0	=0.008m
● 計算の時間刻み幅	=可変（上限 0.001sec）

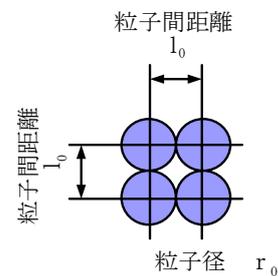


図-4 流体粒子の配列

4. 解析結果と考察

(1) 従来型伏越し

洗浄水による伏越し部の流速は時刻の経過とともに増加し、時刻 $t \doteq 0.6\text{sec}$ では図-5 に示すとおり、伏越し部全体に 0.8 m/sec 程度の流速が分布する結果となった。なお、流速ベクトルの図化には「Graph-R Ver.1.91」を利用している。

また、伏越し中央部 ($x=0.55$ の位置) における流速分布は、時刻 $t \doteq 0.4\text{sec}$ で 0.51~0.83 m/sec であるのに対して、時刻 $t \doteq 0.6\text{sec}$ では 0.64~0.88 m/sec とやや速くなる。

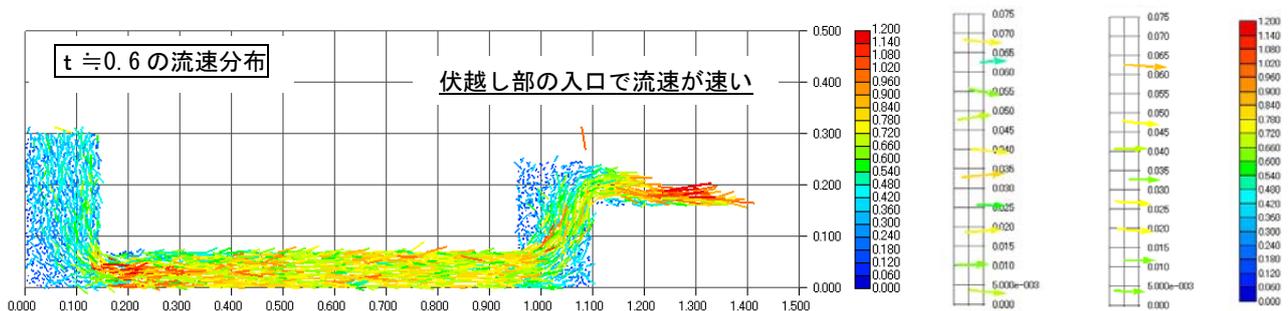


図-5 従来型伏越しの流速分布

(2) 円弧型伏越し

円弧型伏越しにおいても従来型伏越しと同様に、時刻の経過とともに流速が増加する。

時刻 $t \doteq 0.6$ における流速分布は図-6 に示すとおり、従来型伏越しと同時刻と比較すると、円弧型伏越しでは従来型伏越しより速い流速が伏越し全体に分布する。

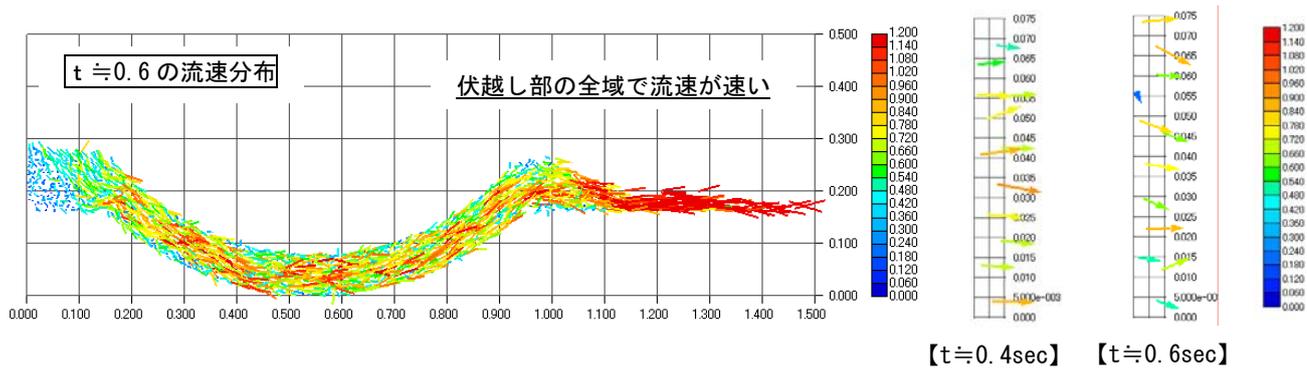


図-6 円弧型伏越しの流速分布

円弧型伏越しでは、伏越し部の水位差と水平距離が従来型伏越しと同じ場合、流下距離は弧状となるため長くなり、摩擦損失の影響により流速は従来型伏越しよりも小さくなると判断しがちである。

しかし、解析結果では、伏越し中央部の流速は時刻 $t \approx 0.4\text{sec}$ で $0.51 \sim 0.94 \text{ m/sec}$ 、時刻 $t \approx 0.6\text{sec}$ で $0.50 \sim 0.89 \text{ m/sec}$ となり、従来型伏越しより流速は速くなる。

これは、円弧型伏越しでは流体に慣性力が作用したことが要因となっている（円弧型伏越しが改良型と呼ばれる理由と考えられる）。

なお、この慣性力を十分に発揮させるためには、伏越し上流部の管きょを伏越しの布設方向と平面的に同一とし、直線的に配置することが重要である。

5. まとめと研究課題

基礎研究の段階ではあるが、粒子法を用いることによって、これまで不明確であった伏越し部における流速分布を再現できることが分かり、伏越し以外の水理現象も粒子法を用いることで解析できると考えられる。

なお、粒子法による流体解析はすでに商用コードが発売されており、3次元の取扱いも可能であり、混相流の解析など多方面で利用されている。

今後、解析対象とする下水道分野の水理現象を広げていくため、以下に示すプログラム開発を行なっていく予定である。

【プログラム開発の課題】

- ①流入・流出境界を持つソースコードの拡張・開発
- ②二次元粒子配置入力データ作成プログラムの開発
- ③解析結果の出力プログラム開発 ※任意位置（面）の流速分布、圧力分布図の作成

【参考文献】

- 1) パソコンで見る流れの科学 数値流体力学入門 矢川元基編著：講談社
第5章 流体を粒子で表現する 越塚誠一 p.190～220
- 2) 粒子法 越塚誠一 日本計算工学会：丸善

【問い合わせ先】 中日本建設コンサルタント株式会社 東京事務所 技術部第1課

TEL 03-5805-8070 E-mail y_ishii@nakanihon.co.jp