

粒子法を用いた伏越し内の流速分布解析の試み

中日本建設コンサルタント(株) 石井 康浩
中根 進

1. はじめに

国土交通省では、下水道の未普及区域に対して早期に整備を進める新たな手法（クイックプロジェクト）を検討し、社会実験を実施している。

その手法の1つに、汚水の面整備管きよの一部に伏越し構造を採用することで埋設深を浅くし、建設費を安価にすることがある。しかし、伏越しは水の流れや夾雑物の堆積による閉塞の心配など、維持管理上の問題があり、一般的には採用されていない。

筆者らは、クイックプロジェクトの社会実験の中で挙げられている、ベンド管などを配置して流水が円滑に流れるよう工夫した改良型に対して、同程度の機能を有すると考えられる円弧型を採用している。その際、維持管理のため、上流伏越しマンホールに簡易な角落しを設置し、汚水を貯留してフラッシュすることで伏越し内を清掃する構造を採用しており、二次元流解析ではあるがフラッシュ時の水理的現象を再現するため、粒子法を用いて伏越し内の流速分布を解析した。

流体の数値シミュレーション手法には差分法、有限要素法などがあるが、水面変動をともなう流体解析は一般的に難しいとされている。これを解析することができる手法で1995年に東京大学の越塚教授が開発した粒子法¹⁾がある。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おり、このプログラムを利用して伏越し内の流速分布を解析した。

2. 粒子法（Moving Particle Semi-implicit：MPS）の概要²⁾

粒子法は連続体を有限の粒子によって表し、連続体の挙動を粒子の運動によって計算する方法である。非圧縮性流れを連続の式とナビエ・ストークスの方程式で表現する。

i.質量保存則 ⇔ 連続の式

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

ii.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)

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

ここに、

ρ : 密度, \mathbf{u} : 流速, P : 圧力, ν : 動粘性係数, \mathbf{f} : 外力 (重力など)

連続の式は、密度の時間変化がゼロ、すなわち密度が時間に対して一定であることを意味する。

D/Dt はラグランジュ微分と呼ばれ、流体とともに移動する視点からの時間微分である。各粒子は速度、圧力の変数を保持しながら移動する。

開発者の越塚教授は、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により、流体運動をシミュレーションできるようにしている。

3. 伏越し部のフラッシュ流速の解析

3.1 下水道管きよの伏越し

伏越しは文献³⁾において、維持管理上の問題点が多いため避けることが望ましいと記載されている。また、文献⁴⁾の小規模な下水道管路施設においても汚水量が少なく、伏越しの断面を縮小しても所定の流速を確保できずに汚泥等の堆積が予想されるため、原則として設置しないと記載されている。

これらの問題点を少しでも改善する目的で改良型伏越しが提案され、一部自治体で実施されている。

伏越しの考え方⁵⁾は、分流式汚水管きよの場合、時間最大汚水量で設計するが、これは上流になればなるほど風呂や台所排水などピーク流量(瞬時最大流量)が大きくなり、総流量は少ないものの、瞬時に大きな流量が流れるためである。

改良型伏越しはバンド管などを配置し、流水が円滑に流れるよう縦断形状を工夫し、瞬時最大流量に期待して、間欠的ではあるが汚物の掃流効果を期待するものである。

筆者らは、伏越し内の堆積物を清掃するため、伏越し上流側人孔に図-1のような角落し(フラッシングゲート板)を設け、上流側の汚水を貯留し、フラッシュできる構造を採用した。この角落しは、硬質ゴム製で、常時はマンホール内のステップに引き上げて吊るしてある。

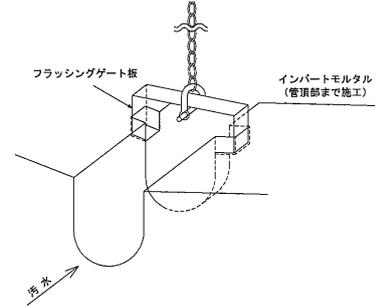


図-1 伏越し上流の角落し例

3.2 伏越し構造の解析モデル

伏越し構造でフラッシュによる掃流効果が期待できるか、粒子法を用いて管内の流速分布を解析する。

利用する粒子法のプログラムは、水理実験で検証されている水柱崩壊問題(2次元)のプログラムコード²⁾である。このプログラムは、粒子径などの物性や計算制御のパラメータを変えずに利用することにより、数値的な安定性などの検討を省略できる。なお、粒子数はプログラム上3,000までに制限されているため、その範囲で伏越し構造をモデル化する。本報告では、小規模な計画流量の一条管伏越し構造について、実際に採用した改良型(円弧型)と、比較検討のために従来型の2タイプを解析モデル(図-2、図-3)とし、フラッシュによる伏越し管内の流速分布を解析する。

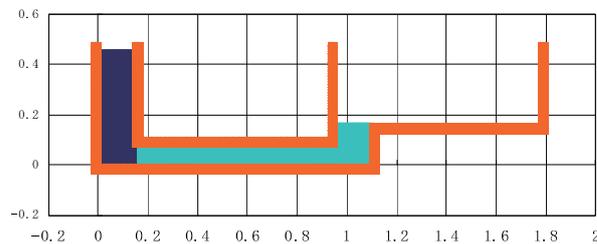


図-2 従来型伏越し解析モデル

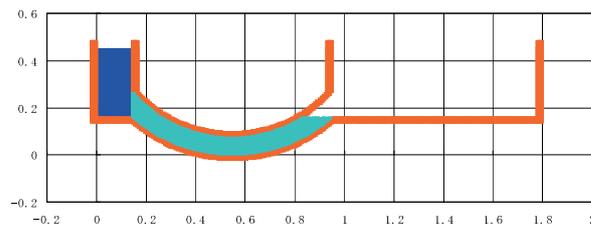


図-3 改良型(円弧型)伏越し解析モデル

3.3 伏越し水理モデルの条件

利用するプログラムは、フラッシュした洗浄水を下流側に流出させることができないため、下流側の伏越し室の断面（延長）を大きくとり、シミュレーション時間内に洗浄水が下流側から逆流しないようにする。

図-4 に伏越し解析モデルの構造寸法を示す。

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	$0.144 \times 0.288 =$ 0.041m^3

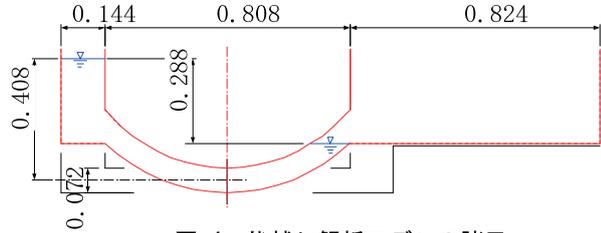


図-4 伏越し解析モデルの諸元

3.4 粒子法計算条件

越塚教授によると粒子配列は、「格子法で用いられるボクセル法やカルテシアン格子法のように、方眼紙状に形状にあわせて整然と並べるように発生させるだけである。」²⁾ としている。また、粒子数密度 (n_0) が均一となる粒子配列が必要である。粒子法のパラメータは、本報告では文献²⁾をそのまま利用し、主な条件は以下のとおりである。図-5 に粒子の初期配列状況を示す。

粒子径 r_0	0.008m
初期粒子間距離 l_0	0.008m

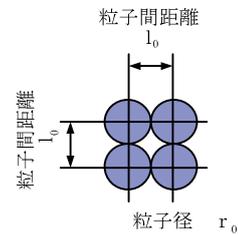


図-5 流体粒子の配列

計算の時間刻み幅 可変（上限 0.001sec）

また、壁境界には座標を固定した壁粒子を配置する。壁粒子には図-6 に示す 2 種類あり、流体粒子と接する最内側では圧力を計算し、外側では圧力を計算しないようにする。最内側で圧力を計算する壁粒子は、流体粒子と同じように粒子数密度を計算する。そのため、その外側にも壁粒子が存在しないと粒子数密度が低下して自由表面と判定される。そこで、圧力を計算する内側の壁粒子の外側には、重み関数の広がり範囲まで壁粒子を追加する必要がある。重み関数の半径 r_e を粒子間距離 l_0 の 2.1 倍とすると、圧力を計算しない外側の壁粒子は 2 層必要になる。

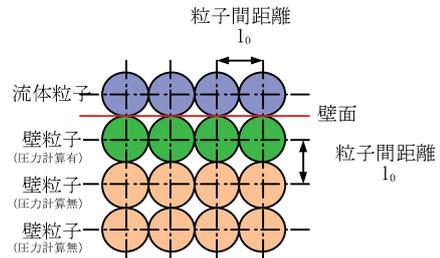


図-6 壁面粒子の配列

4. 解析結果と考察

解析結果として、図-2 の従来型伏越しと図-3 の円弧型伏越しの数値シミュレーション結果を示す。

4.1 従来型伏越しの解析結果

時刻の経過とともに洗浄水が流下し、流速が増加する。図-7($t=0.4\text{sec}$)に比較して図-8($t=0.6\text{sec}$)の流速が増加している様子が流速ベクトルで色別できる。時刻 $t=0.4\text{sec}$ で伏越し上流部の流速が 1.0m/sec であったものが、時刻 $t=0.6\text{sec}$ になると伏越し部全体に流速 1m/sec 程度が分布するようになる。

伏越し中央部 ($x=0.55$ の位置) における流速分布を図-9、図-10 に示す。図-9($t=0.4\text{sec}$)の時、 $0.51\sim 0.83\text{m/sec}$ であったものが、図-10($t=0.6\text{sec}$)では $0.64\sim 0.88\text{m/sec}$ とやや速くなる。

汚水では、沈殿物が堆積しないよう、流速³⁾は 0.6m/sec 以上、雨水では 0.8m/sec 以上とされており、従来型伏越しは一時的にこれらの流速が確保されている。

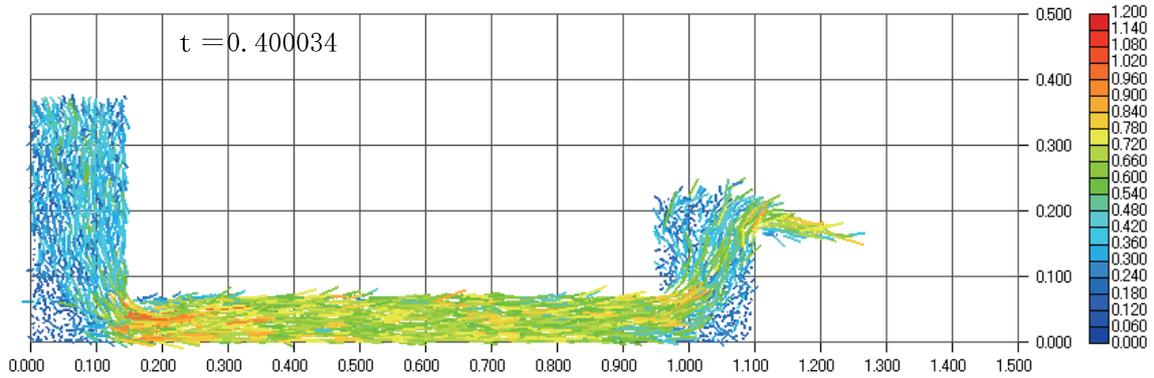


図-7 従来型伏越しの流速分布 ($t \doteq 0.4\text{sec}$)

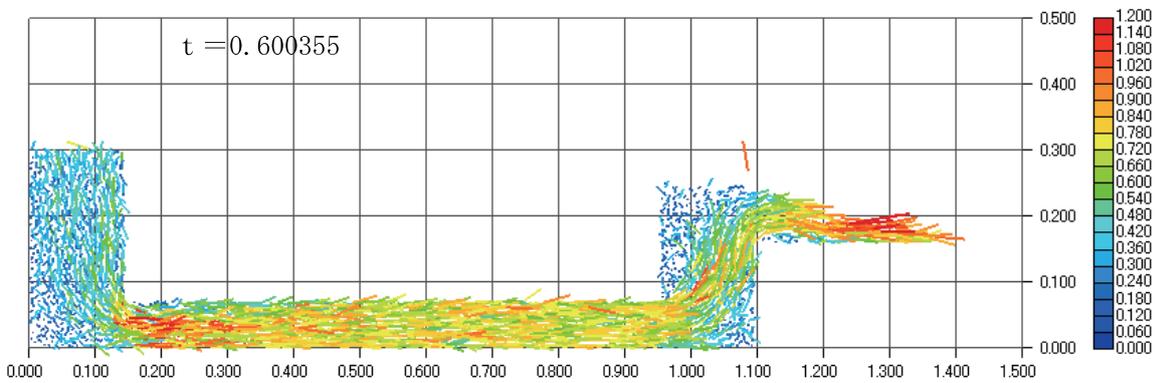


図-8 従来型伏越しの流速分布 ($t \doteq 0.6\text{sec}$)

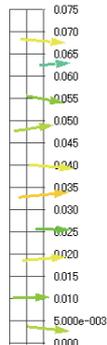


図-9 伏越し中央部流速分布 ($t \doteq 0.4\text{sec}$)

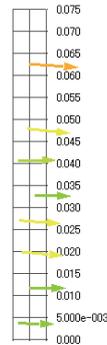


図-10 伏越し中央部流速分布 ($t \doteq 0.6\text{sec}$)

4.2 円弧型伏越しの解析結果

円弧型伏越し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していく。図-11 に $t \doteq 0.4\text{sec}$ を、図-12 に $t \doteq 0.6\text{sec}$ の流速分布を示す。

円弧型伏越しでは、伏越し中央部の流速は $t \doteq 0.4\text{sec}$ (図-13)の時で $0.51 \sim 0.94 \text{ m/sec}$ 、 $t \doteq 0.6\text{sec}$ (図-14)の時で $0.50 \sim 0.89 \text{ m/sec}$ となっており、ほぼ同じ時刻でも従来型伏越しと比較して、速い流速が伏越し全体に分布している。

伏越し部の水位差と水平延長は同じであるが、伏越し部の延長は弧状となっている円弧型伏越しの方が長くなるため摩擦損失が大きく、流速は従来型伏越しに比べて小さくなると思われがちである。

しかし、流体に慣性が働くことから、円弧型の方が流速が速くなったと考えられ、この効果が改良型と言われる伏越しの特長である。

なお、この慣性力を発揮させるには、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じにして、直線的に配置することが重要と考えられる。

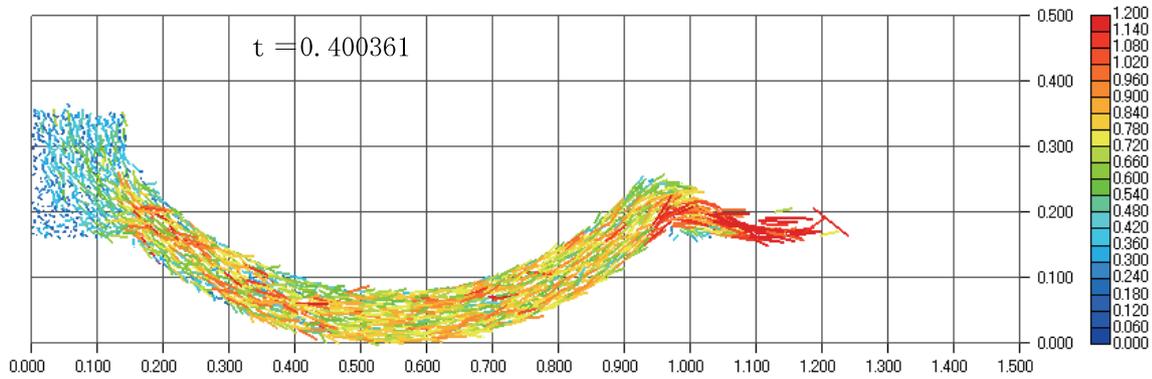


図-11 円弧型伏越しの流速分布 ($t \doteq 0.4\text{sec}$)

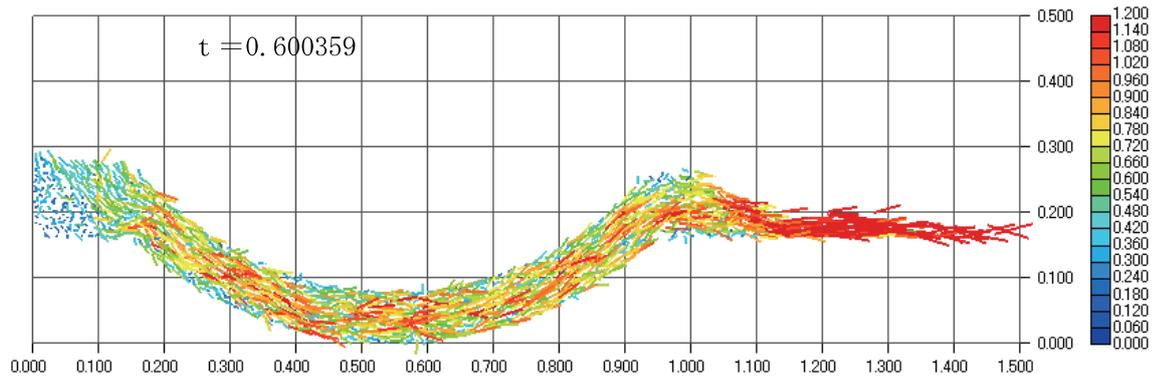


図-12 円弧型伏越しの流速分布 ($t \doteq 0.6\text{sec}$)

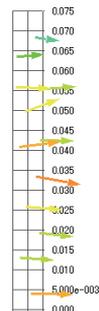


図-13 伏越し中央部流速分布 ($t \doteq 0.4\text{sec}$)

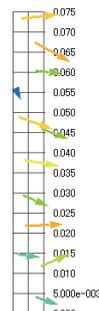


図-14 伏越し中央部流速分布 ($t \doteq 0.6\text{sec}$)

4.3 伏越し中央部の流速分布比較

従来型と円弧型伏越しの伏越し中央部の流速分布 ($t \doteq 0.6\text{sec}$) を比較する。

粒子法の流速は、粒子位置が一定していないので、任意位置での流速分布は、時間と位置 (x, y) で補間して求めなくてはならない。

ここでは、 $x=0.51 \sim 0.59$ 間の粒子を抽出し、時刻 $t \doteq 0.6\text{sec}$ で位置 (x, y) について傾向面モデル⁵⁾ (trend

surface model) の三次式を使って流速分布の面を近似し、その近似式から $x=0.55$ 位置 (図-15) の流速分布(u, v 合成流速)を算出する。

傾向面モデル

$$z = f(x, y) = \sum_{0 \leq i+j \leq m} a_{ij} x^i y^j + e$$

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2$$

ここに x, y : 図-2, 図-3 に示す座標値

z : u, v 合成流速 m/sec

傾向面モデルを用いて近似した、管底部における流速分布を 図-16 に示す。

円弧型伏越しは 図-16 に示すとおり、従来型に比べ伏越し部管底の流速が速く、管底の堆積物を流下させるのに適した構造と考えられる。

5. まとめ

粒子法を用いた流体解析を行うことで、従来型と改良型伏越しの縦断形状の違いによる、フラッシュ時の流速分布の違いが明らかになった。円弧型では管底に速い流速が見られ、夾雑物を押し流す機能があり、掃流効果が従来型より期待できると考えられる。

今後、研究解析を進めることにより、管底部の流速が速いという伏越しとしての優位性を保つため、適切な円弧の半径と伏越し長などが定まるものと考えられる。

また、粒子法を用いることでフラッシュ効果を流速分布で検討することが可能であり、例えば沈殿池や反応槽の流跡を粒子法で解析することで死水域を把握し、有効容量のチェックに利用するなど、伏越し以外にも下水道分野で利用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次元を扱うことができ、混相流の解析も可能となり多方面で利用されている。

下水道分野で解析対象とする水理現象を広げるためには、これら商用プログラムを利用するか、本研究で利用したソースプログラムの拡張、粒子配置の効率化などのプログラム開発を行なっていく必要がある。

<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
- 3) 下水道施設計画・設計指針と解説(2001年度版)
- 4) 小規模下水道計画・設計・維持管理指針と解説 1996年版
- 5) 下水道実施設計の手引(案) —コスト縮減案— 平成15年 愛知県水と緑の公社
- 6) 地理情報システムを用いた空間データ分析 張 長平 古今書院 p.131~133

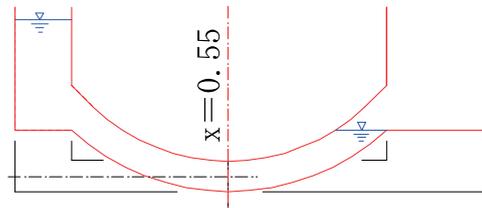


図-15 従来型と円弧型流速分布の表示位置

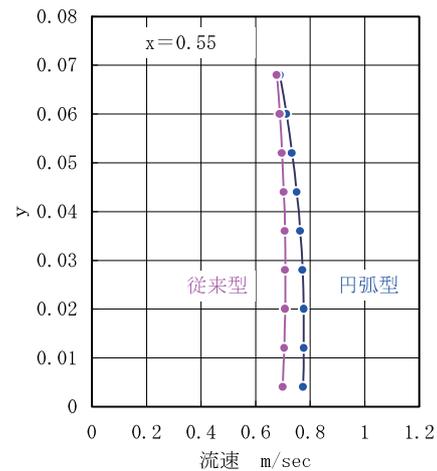


図-16 従来型と円弧型伏越しの流速分布比較