

三次元非定常流体解析による横越流堰の越流量推定

中日本建設コンサルタント(株) ○奥村 元尚 中根 進

下水道の管路や処理施設は多く堰構造を有している。放流流量を測定する全幅堰や初沈、終沈、重力濃縮槽には三角ノッチを持った堰がある。これら多くの堰は正面越流に分類される。一方、管路の雨水吐き室や本管から貯留施設に分水、流入させる堰に横越流形式の堰がある。また、処理施設では反応槽のステップ水路の可動堰が横越流形式である。

これら越流の堰幅、越流水深の計算式は、水理公式集などに示されているが、横越流に関しては、計算は容易でない。中でも、円形管に設けられた横越流堰の計算手法は見当たらないので有限要素法により三次元の非定常流解析で解析し、越流量の推定を試みた。

Key Words : 横越流、非定常流解析、有限要素法、雨水吐室、ステップ水路

1. まえがき

横越流堰が設置されている施設に図 1.1 に示すような雨水吐室、貯留施設への分水施設や反応槽ステップ水路などがある。

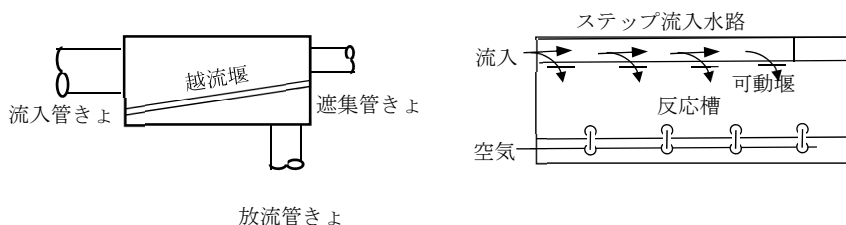


図 1.1 雨水吐室、反応槽ステップ水路

これら施設の越流堰を設計する際、横越流の式を利用するが、水理公式集などに式の紹介はあるが、ほとんど矩形水路に設置された堰を想定したものである。

横越流に関しては、既往論文に次の記述がある。「横越流ぜきの水理機能に関しては古く 1910 年代より Hinds、Favre、Engels などにより実用的見地に立った理論的ならびに実験的研究が行なわれているが、DeMarchi がせきに沿っての比エネルギーが一定とした仮定と連続式とから主水路内の水面形を表わす線型微分方程式を導いたものおよび Frazer がせきに沿って示される水面形を 5 種類に分類した研究がわずかに注目され、実用的解析法として広く用いられてきた。」¹⁾

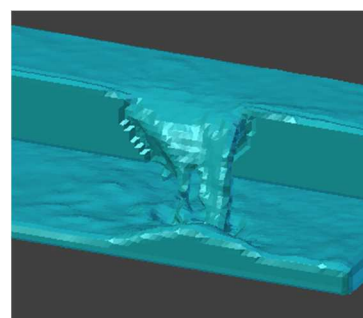


図 1.2 格子ボルツマン法による矩形水路の横越流の様子

円形管に設置された越流堰には、水理模型実験のほか、目安として数値解析に頼らざるを得ないと思われる。三次元数値流体解析として図 1.2 に示す格子ボルツマン法²⁾はあるが、本稿では、有限要素法による三次元非定常流解析によって横越流堰を持つ円形管、矩形水路の解析を行い、堰からの越流量を推定した事例を示す。

2. 円形管横越流堰の越流量検討

2.1 円形管に沿った横越流堰

図 2.1 のように円形管に沿って横越流堰を設置した時の越流量を検討する。

- 本管径 : 1.0 m
- 本管流水深 : 0.5 m
- 堰上流長 : 1.0 m、堰下流長 : 1.0 m
- 堰長 : 2.0 m
- 越流水深 : 0.1 m

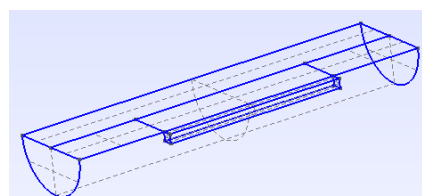


図 2.1 円形管に沿った横越流堰の解析モデル

ここに、本管の流速を $v = 1.0 \text{ m/sec}$ とした解析結果を図 2.2 に示す。

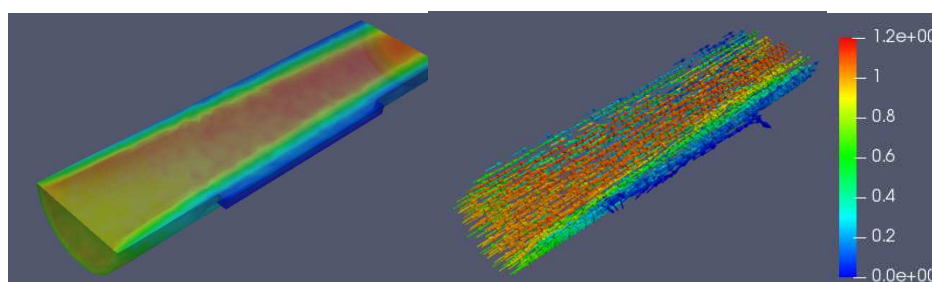


図 2.2 横越流堰のある円形管の流速分布(本管流速 1.0 m/sec)

本管流速を 0.6 m、1.0 m とし、越流水深を 0.1 m で解析したが、越流堰にわずかに流向の変化は見られたが、越流まで至らなかった。

管きよ内面に沿った横越流堰のため表 2.1 に示すように本管に流れてしまい、ほとんど越流できていない。図 2.3 に越流割合を示す。非定常流解析であるため、計算時間を多くとる必要があったと考えられる。

表 2.1 本管流速 0.6、1.0m/sec における円形管、堰部の流速、流量

本管入口	平均流速	0.6 m/sec	1.0 m/sec
本管出口	平均流速	0.313 m/sec	0.644 m/sec
	平均流量	0.123 m ³ /sec	0.253 m ³ /sec
横越流堰	平均流速	0.004 m/sec	0.008 m/sec
	平均流量	0.001 m ³ /sec	0.002 m ³ /sec
出口計	平均流量	0.124 m ³ /sec	0.254 m ³ /sec

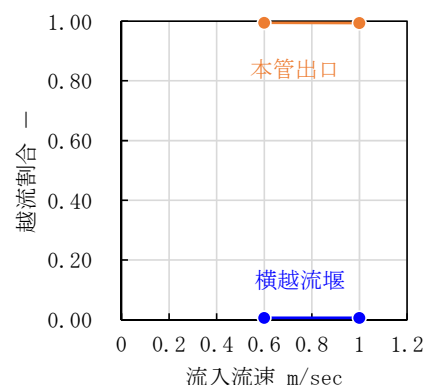


図 2.3 横越流堰からの越流割合

2.2 堰室のある横越流堰

図 2.4 に示す堰室を設け、水流を堰室下流側の壁に当てて堰からの越流を促す。

- 本管径 : 1.0 m
- 本管水深 : 0.8 m
- 横越流堰幅 : 2.0 m
- 越流水深 : 0.2 m
- 堰室長 : 2.0 m
- 堰室幅 : 1.4 m
- インバート : 半管

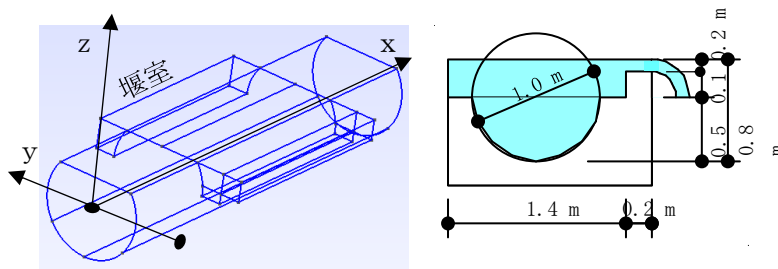


図 2.4 堰室のある横越流堰の解析モデル

解析の結果を図 2.5 に示す。

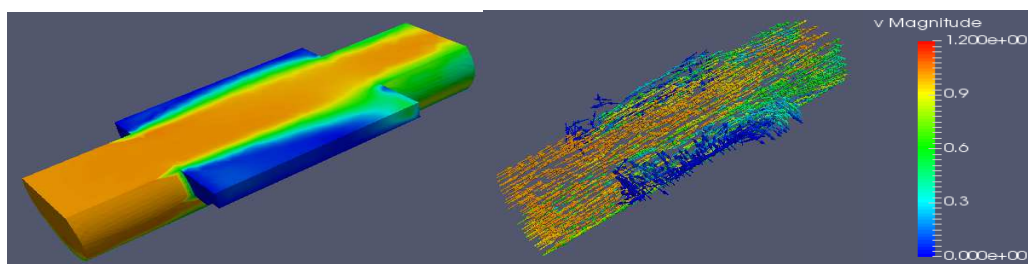


図 2.5 堰室のある円形管の流速分布(本管流速 1.0 m/sec)

本管の流速を変化させた解析による越流割合は表 2.2、図 2.6 の通りである。

2.1 に示す本管に沿った横越流堰より下流側の堰室の壁による水流の阻害効果により越流量が大きくなったものと思われるが、本管流速が 0.6 m/sec の越流割合は流量で 2 割にも達しない。また、本管流速が速くなると越流割合も小さくなる。

表 2.2 横越流堰からの越流割合

入口流速	流量割合		
	0.6	1	1.4
本管出口	0.84	0.86	0.90
横越流堰	0.16	0.14	0.10

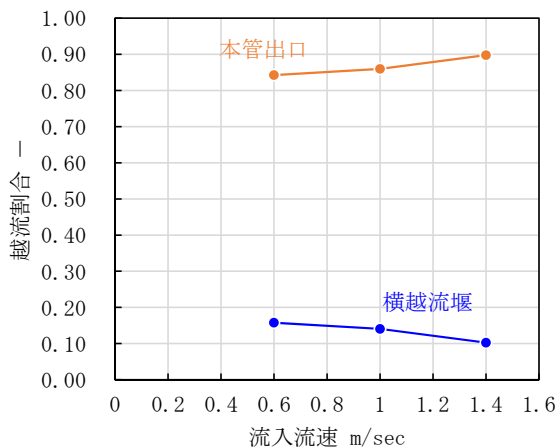


図 2.6 横越流堰からの越流割合

2.3 堰室のある垂れ堰付横越流堰

2.1、2.2 に示した横越流堰と堰室だけでは、多量の越流量が見込まれないので、本管の流れを阻害して、横越流堰に水の流れを導くように堰室出口部に垂れ堰を設ける。垂れ堰は、実施設では堰室内に設けるが、解析モデル(図 2.7)では、堰室外側になっている。

- 本管径 : 1.0 m
- 水深 : 0.8 m

横越流堰幅 : 2.0 m
 越流水深 : 0.2 m
 堰室長 : 2.0 m
 堰室幅 : 1.4 m
 インバート : 半管
 垂れ堰 : 水面下 0.2 m

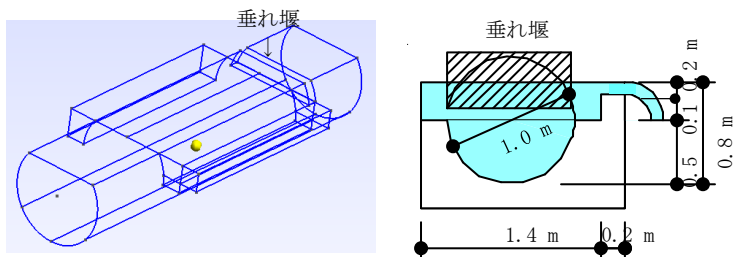


図 2.7 垂れ堰のある横越流堰の解析モデル

本管流速を 1.0 m/sec とした場合の結果を図 2.8 に示す。また、本管の流速を変化させた解析による越流割合は、表 2.3、2.4 と図 2.9 の通りである。

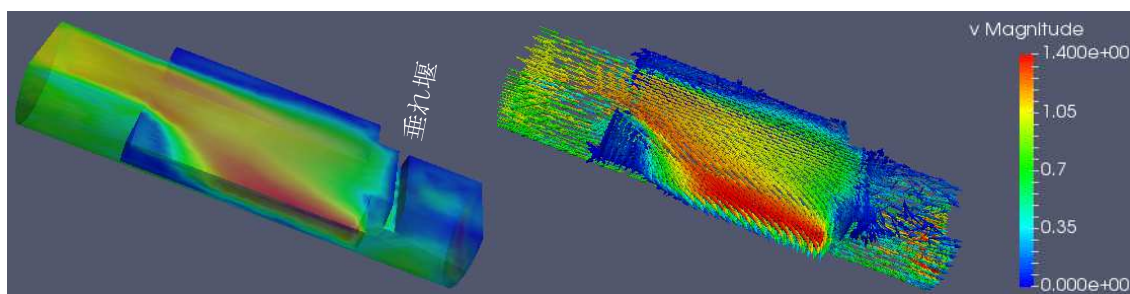


図 2.8 堰室に垂れ堰のある円形管の流速分布(本管流速 1.0 m/sec)

表 2.3 本管流速 0.6, 1.0, 1.4 m/sec における垂れ堰のついた円形管、堰部の流速、流量

本管入口	平均流速	0.6 m/sec	1 m/sec	1.4 m/sec
	平均流量	0.404145 m ³ /sec	0.673574 m ³ /sec	0.943004 m ³ /sec
本管出口	平均流速	0.515431 m/sec	0.862944 m/sec	1.269564 m/sec
	平均流量	0.347181 m ³ /sec	0.581257 m ³ /sec	0.855146 m ³ /sec
横越流堰	平均流速	0.450609 m/sec	0.733709 m/sec	0.984185 m/sec
	平均流量	0.180244 m ³ /sec	0.293484 m ³ /sec	0.393674 m ³ /sec
出口計	平均流量	0.527425 m ³ /sec	0.874741 m ³ /sec	1.24882 m ³ /sec

表 2.4 垂れ堰のある横越流堰からの越流割合

入口流速	流量割合		
	0.6	1	1.4
本管出口	0.66	0.66	0.68
横越流堰	0.34	0.34	0.32

2.4 横越流による越流のまとめ

シミュレーションでは、本管の流れに平行に横越流堰を設け、本管の流れの直角方向には越流しにくいことを示した。

一例のシミュレーションの結果は、本管流速が 0.6 m/sec と小さい場合に越流割合は 16% しかない。

やむを得ず垂れ堰を付けて本管の流れを障害しても 34% の越流割合であり、本管の流速を増加していくと越流割合は小さくなる。

横越流堰の設置だけでは、計画通り越流できない可能性が高いことを考慮して、垂れ堰を

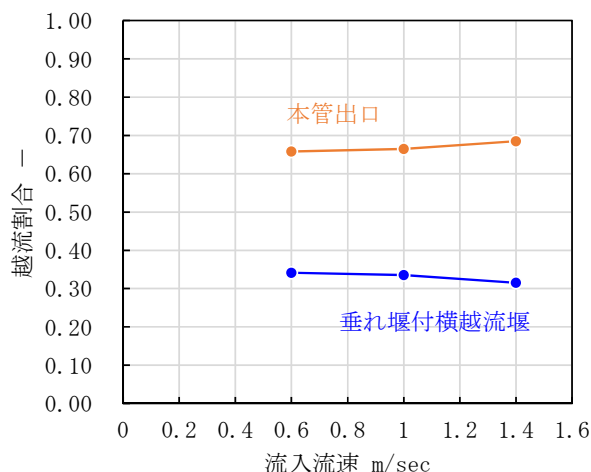


図 2.9 垂れ堰のある横越流堰からの越流割合

設置できるような堰室の構造としておくことが望ましい。

3. 反応槽ステップ水路の 3 次元非定常流体解析による可動堰の高さの検討

標準活性汚泥法において処理量を増やすために初沈流出水を反応槽のステップ水路を使って流入させることがある。

反応槽ステップ水路における各可動堰からの越流量を均等とするための堰高の設定を 3 次元非定常流体解析により示す。

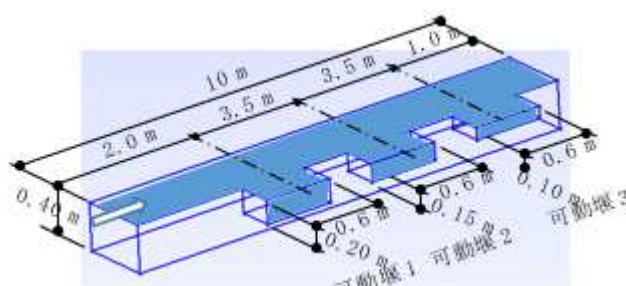


図 3.1 反応槽ステップ水路の解析モデル

3.1 数値解析モデル

数値解析モデルは以下とする。

流入流速 0.60 m/sec

流入量 $0.6 \text{ W} \times 0.4 \text{ H} \times 0.60 = 0.144$

m³/sec

3.2 均等流入のため可動堰高を変えた計算

均等流入のために可動堰高は、上流から下流にいくに従い高く設定し、徐々に越流水深を小さくしていく。ステップ水路内の流速分布と越流の様子を図 3.2 に示す。

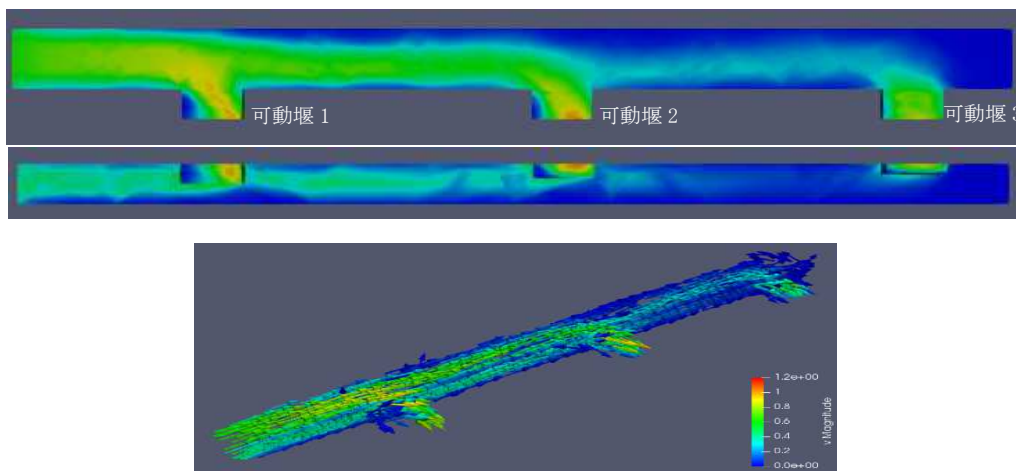


図 3.2 可動堰高さを変えたステップ水路の流速分布(水路流速 0.6 m/sec)

非定常流解析で計算時間 $t = 4000$ 時、各可動堰からの越流量は表 3.1 の通りである。

各可動堰からの越流量を均等にすることを目指して堰高を設定したが、最下流の可動堰からの越流量が不足しており、計算時間をも少し長くとりか、越流水深を少し大きく設定する必要があった。

表 3.1 各可動堰からの越流量(ステップ水路流速 0.6 m/sec)

	越流水深	平均越流速	越流量
可動堰1	0.20	0.412	0.049
可動堰2	0.15	0.660	0.051
可動堰3	0.10	0.519	0.031
計			0.131

3.3 可動堰高一定の越流量

3.2 との比較のために、可動堰高を一定(越流水深 0.15 m)とした場合について解析し、越流量を計算した。ステップ水路内の流速分布と越流の様子を図 3.3 に示す。

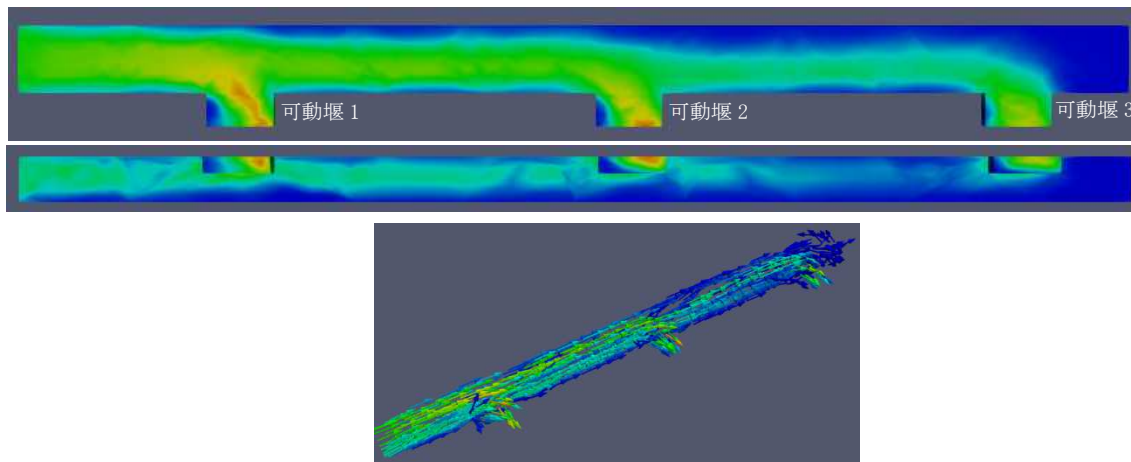


図 3.3 可動堰高一定のステップ水路の流速分布(水路流速 0.6 m/sec)

表 3.2 に各可動堰からの越流量を示すが、下流側の可動堰からの越流量より上流側の可動堰の越流量の方が少なくなっている。上流側の可動堰 1 が最も越流量が少なく、均等な越流量とするには、下流側の堰高より低く設定する必要がある。

表 3.2 堰高さを一定にした場合の越流量
(ステップ水路流速 0.6 m/sec)

	越流水深	平均越流速	越流量
可動堰1	0.15	0.437	0.039
可動堰2	0.15	0.593	0.045
可動堰3	0.15	0.507	0.045
計			0.130

4. まとめ

今回報告した解析モデルの各部寸法は実施設のものではなく、解析計算例を示すだけのものであるが、横越流堰の計算機会は多くはないので、実施設の設計に当たっては、このような数値解析で目安を得ることは有効な手法と考えられる。また、横越流堰による分水量は思ったほど多くないので、設計に当たっては注意を要する。

また、反応槽のステップ水路で反応槽各部に均等に流入させるためには、下流の堰高を上流より高く設定する必要があることを示した。

なお、以上の解析結果は、非定常流解析のため計算ステップの終了時間により越流量が変わることがあり、この点について留意が必要である。

<参考文献>

- 1) 中川博次・宇民正：横越流分水工の機能設計に関する研究 京大防災研究所年報第 9 号 (昭. 41. 3)
- 2) 中根 進：格子ボルツマン法による下水流れの可視化—手軽に流れを観察する— 月刊下水道 Vol. 36. No. 10 2013(増刊号)