

排水機場の吸込水槽の性能評価へのCFD解析の適用性

山元 弘* 石松 豊** 河北憲治***

1. はじめに

排水機場は、出水時に国民の生命と財産を守るための重要設備である。これまで、機能や信頼性を確保しつつ、コスト構造改善の要請に応える、建設、更新、維持管理の効率化の種々の取組がなされてきた。また、機能向上（排水能力や運転水位）に安価に応える要請もある。

排水機場で、同じ排水能力で、安くする方策のひとつに、水の流れを速くし、主ポンプや流路をはじめとして、設備自体を小さくする方策がある。この20年間程度で種々の取組があり、「揚排水ポンプ設備設計指針（案）」¹⁾（以下 指針案）にも反映されてきた。

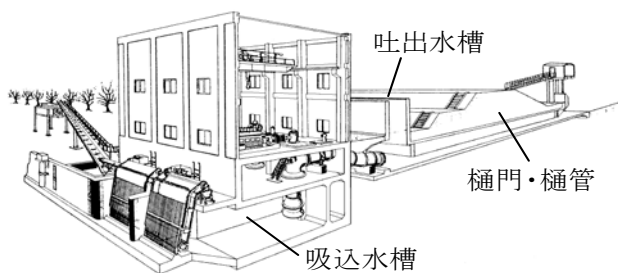


図-1 排水機場透視図

我々の以前の取組では、ポンプ単機流量 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以下の吸込水槽について、(社)河川ポンプ施設技術協会との共同研究等により、模型実験を行い、適切な標準形状・寸法・整流板を決定し、指針案に反映した。

一方、コンピュータ性能および解析技術の向上によって、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析の高精度化が進んでいる。CFD解析とは、流体の基礎方程式を離散化し、コンピュータで解を得る解析手法である。

本研究は、吸込水槽にCFD解析を用いた性能評価を可能とし、模型実験が不要な範囲を拡大し、排水機場の計画、建設、更新に資するものである。

2. 研究の概要

2.1 吸込水槽に着目

排水機場の流路には、流入水路、吸込水槽、吐出水槽、樋門・樋管がある。

吸込水槽においては、空気吸込渦や水中渦が発生すると、ポンプに悪影響を及ぼすが、発生する渦が水槽の大きさに比べて小さい等、解析が難しい。本研究は、この解決に着目している。

なお、流入水路には、水流の均等性が求められるが、従前よりコンピュータ解析が行われてきた。また、吐出水槽についてはサージタンクの役割を果たすが、これを省略する場合の樋門・樋管の圧力脈動による影響は、別途の検討がなされているため、ここでは省略する。

2.2 研究のポイント

本研究では、模型実験による比較検証を行い、CFD解析方法と有害渦発生判定手法を提案する。

端的には、対象の吸込水槽で可能な、最大ポンプ流量と最低運転水位を、あらかじめ計算可能とすることである。

2.3 成果活用の想定

2.3.1 主ポンプの更新時

主ポンプ更新時には、背後地の状況が変化し要求される排水機場の能力も変化していることが少なくない。また既存の土木構造物を使って、少ない追加投資でポンプ能力を上げられる場合もある。

この時、既存の吸込水槽に整流板を追加することで、どれだけ流量を増加できるか、運転水位をどれだけ下げることができるか、あらかじめ検討できると都合がよい。更新の対象となるような年代の排水機場では、吸込水槽にはある程度の余力が期待できるのが通常である。

2.3.2 内水排除計画の見直し時

流域内の既存各排水機場で、前項と同様に検討できると都合がよい。これは、効率的な内水排除計画やB/Cの向上に資するものと考えている。

2.3.3 新設機場の設計時

設計の自由度を上げることができ、また今後の性能発注に向けては、一定の事前評価可能な手法へのベースとなると考えている。

3. CFD解析の適用

3.1 CFD解析概要

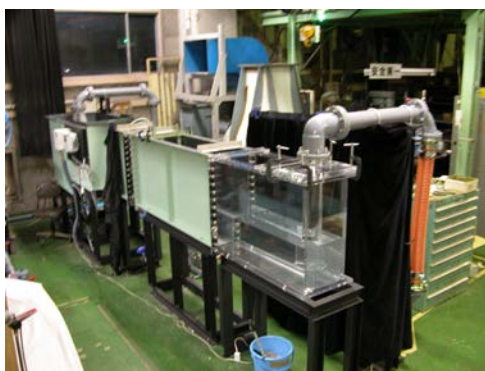
CFD解析には、空間に格子を切る有限体積法や、渦要素を追跡する渦法等がある。有限体積法は、市販の汎用CFD解析ソフトに用いられており、解き方は多様にあるが、一般的に、複雑な流れ場の計算には、細かい格子が必要で計算負荷が大きい。

3.2 渦法

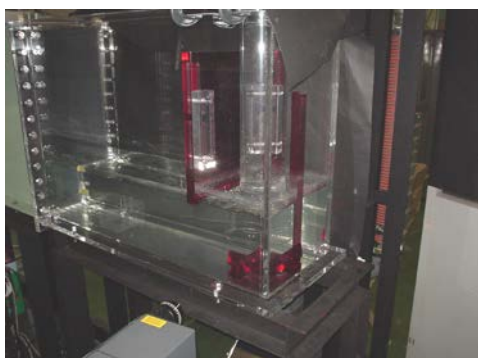
渦法は、流れ場を多数の微小渦要素によって離散的に表し、渦要素の移動を追従することにより非定常解析するものである。格子が必要なく、流れの変化が激しい部分には自ずと渦要素が集中し、詳細な計算がなされるようになっている。

3.3 吸込水槽への適用

吸込水槽では、渦がどこで発生するかわからず、発生しても強さや位置が変化する非定常性があるため非定常解析が望ましい。また渦径が小さいため、高解像度が必要である。



図写真-21 試験装置



図写真-22 吸込水槽形状

渦法では、計算の解像度は自動的に調整され、非定常解析も実用的な計算時間で可能である。このため、本研究では、渦法を用いている。

4. 模型実験の実施

4.1 実験条件

CFD解析結果による渦判定との比較のため、水槽幅300mmの小模型で実験を行った。ポンプを擬した吸上げ管内径は100mmである。試験装置を写真-1に示す。水槽形状はH13年版指針案¹⁾で新しく加えられた渦流防止板付吸込水槽とした(写真-2)。

4.2 試験結果

水位を150~300mm、流量を0.2~2.0m³/min程度で変化させ、渦発生限界を求めるとともに、渦の発生状況を観察した。空気吸込渦発生の様子を図-2に、渦発生の有無の確認結果を図-3に示す。図中の%は観察時間中の渦の発生時間の割合である。

5. 吸込水槽のCFD解析

5.1 解析条件

模型実験と同形状の吸込水槽について、渦法でCFD解析を実施した。解析水槽形状を図-6に示す。

5.2 解析結果

渦の発生が明瞭にわかる、水位250mm、流量0.55m³/minの条件を計算した結果を図-5,6,7に示す。模型実験結果と同じく、流入方向に向かって左側(図の下側)に渦が発生しているのがわかる。

6. 吸込水槽の性能評価

6.1 CFD解析による渦発生の判定

定量化の観点から、現状のCFD解析の精度を踏まえつつ、その結果を利用した渦判定手法を検討した。

6.1.1 伸張渦モデルと渦要素モデル

伸張渦モデルを付加して渦が空洞となるか否かを評価する手法²⁾は、実際に近い渦が予測されており、実用的手法として活用可能と考えた。^{3, 4)}

渦法は、流れ場を表す離散要素として上記の伸張渦モデルと類似のモデルでマイクロにとらえた渦要素モデルを用いており、渦要素中心圧力を簡単

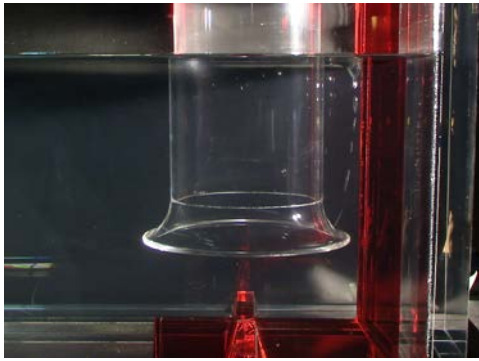


図-42 空気吸込渦発生の様子（水位230mm、流量0.5m³/min）

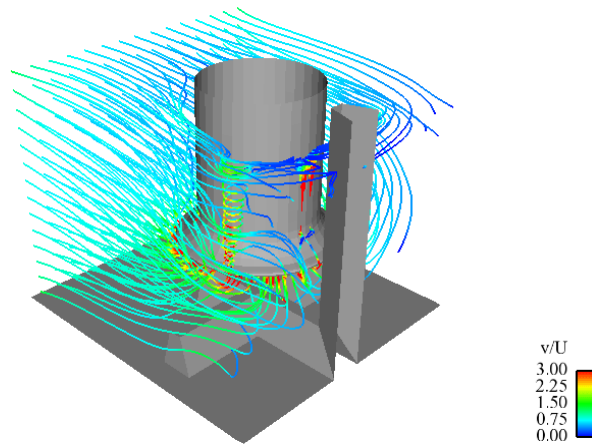


図-75 流线透視図

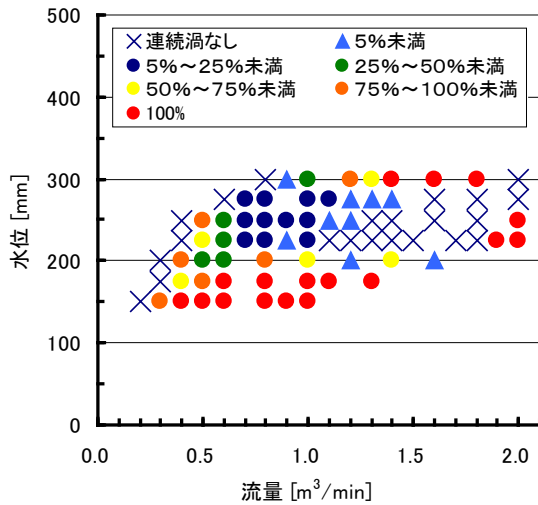


図-53 空気吸込渦発生特性

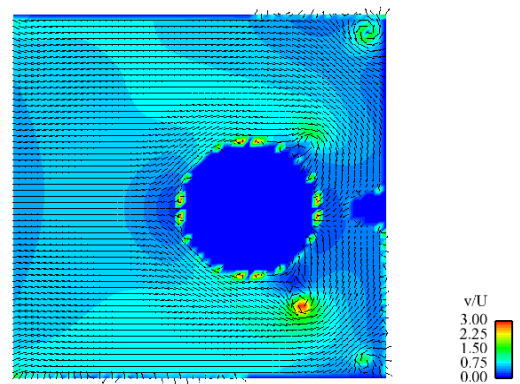


図-86 速度分布（水面とベルマウスの間水位）

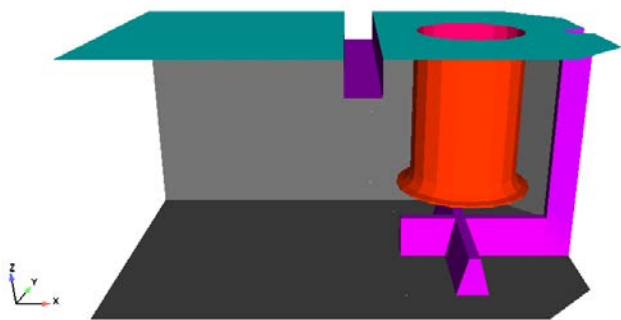


図-4 解析水槽形状

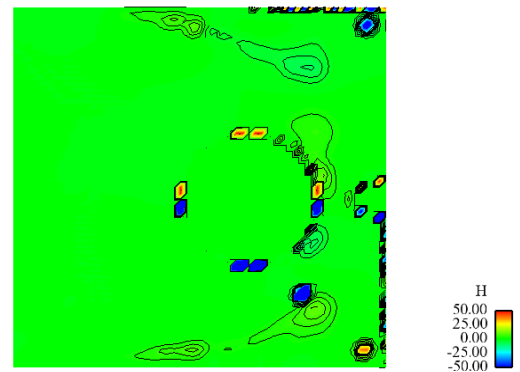


図-79 ヘリシティ分布（水面とベルマウスの間水位）

に算出できる。渦要素中心圧力が最小値となる渦要素が渦の中心にあるとみなせば、位置も定まる。

6.1.2 渦の判定

適切な対象検査領域を設け、その中の渦要素の渦中心圧力の最低値を用いて、渦の発生の判定を以下のように行うこととした。

$$\frac{p_{\infty} - p_c}{p_h} > 1 \quad \text{空気吸込渦発生の判定} \quad (1)$$

$$\frac{p_{\infty} - p_c + p_h}{p_{cr} - p_c} > 1 \quad \text{水中渦発生の判定} \quad (2)$$

ここで、 p_{∞} : 渦要素の無限遠方の圧力

p_h : 渦中心のヘッド圧

p_c : 渦中心圧力

p_{cr} : 飽和蒸気圧

である。空気吸込渦では渦中心圧力がヘッド圧より小さくなる場合、水中渦では渦中心圧力が飽和蒸気圧より小さくなる場合に1より大きな値となる。

6.2 判定手法の結果と模型実験との比較

5章のCFD解析の結果を使い、前記の手法で渦判定を行った。検査領域は水面および水面とベルマウスの中間水位とし、両領域で判定値が1を超える状態が5%程度以上で空気吸込渦発生と判定した。水位250mmの場合の判定値の時間変動を図-8に、水位150mmも加えて模型実験との比較を図-9に示す。後者はデータが重なるため、計算結果は10mm水位を上げた位置に表示している。

比較の結果は良好で、少なくとも空気吸込渦について、本判定手法が適用可能と考えられる。

7. おわりに

CFDによる渦発生の判定と模型実験との比較を行い、通常の渦流防止板付オープン形吸込水槽では精度良く渦発生限界を予測できることがわかった。これにより、CFDを活用した吸込水槽の性能評価がある程度可能となった。

通常設けられる底面十字板の水中渦抑止効果は高く、空気吸込渦が支配的になるため実用上の問題はないが、今後、他形状や水中渦について実際の試行等により検証していくことも必要である。

この結果に基づき、発注者側でCFDを活用した検討が行えるように『CFD解析によるポンプ吸込水槽の性能評価手順書』を作成した。

今後は、現場で試行いただき、この手順書を用いて、実際の更新検討機場でCFDを用いた吸込水槽性能の検討を行い、その有効度を示した上でCFDの活用を促進していきたいと考える。

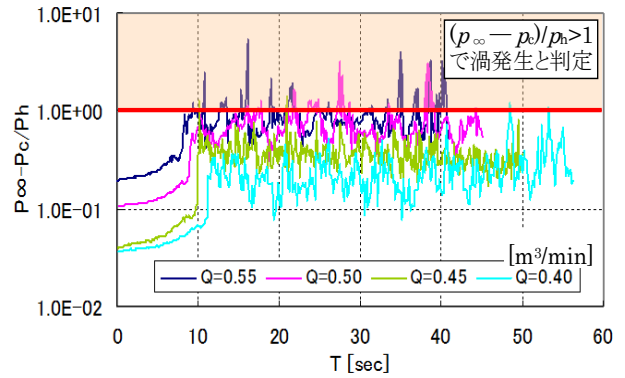
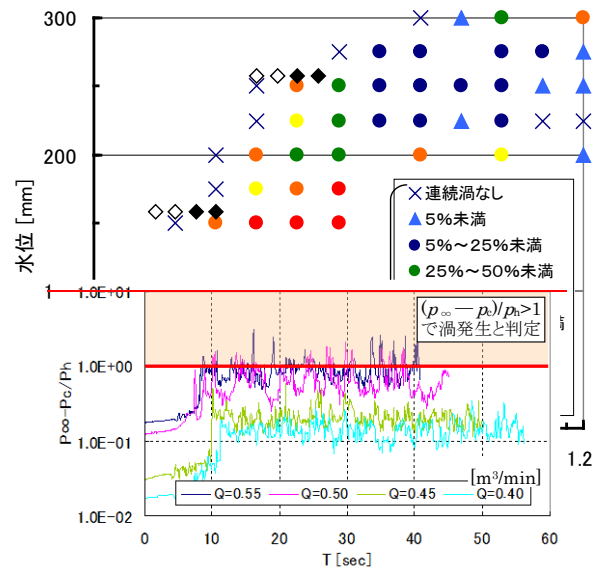


図-8 水面付近の判定値 (水位250mm)



- 2) Burgers, J. M., "A mathematical model illustrating the theory of turbulence", *Advances in Applied Mechanics*, 1 (1948), pp.171-199, 1948
- 3) ターボ機械協会：「ポンプ吸込水槽の模型試験方法」、ターボ機械協会基準、TSJ S 002、2005
- 4) 山元弘、山本幸広：CFDを活用したポンプ吸込水槽の性能評価手法に関する研究、土木技術資料、Vol.47 No.6、pp.58-63、2005

参考文献

- 1) (社) 河川ポンプ施設技術協会：「揚排水ポンプ設備設計指針 (案) 同解説、2001

山元 弘*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部先端技術
チーム主任研究員
Hiroshi YAMAMOTO

石松 豊**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部先端技術
チーム主任研究員
Yutaka ISHIMATSU

河北憲治***



株式会社西島製作所研究開発部
(前 独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部先端技術
チーム主任研究員)
Kenji KAWAKITA