

境界要素法による貯水池内の流れ解析と拡散解析

九州産業大学大学院 学生員○甲斐啓介 九州産業大学 正会員 加納正道
 福岡大学 黒木健実 九州産業大学 正会員 中村直史
 九州産業大学大学院 学生員 川原崇廣 九州産業大学 正会員 赤坂順三

1. はじめに 貯水池における問題として富栄養化や底層水塊の貧酸素化が挙げられるが、これらの問題に対する対策・予測評価のためには、流況および物質拡散を表現し得る数値解析が必要と考えられる。そのため、本報では2種類の境界要素法 (BEM) 解析手法を提案している。一つは、Navier-Stokes 方程式 (N-S 式) にペナルティ法を適用した BEM 流れ解析であり、他の一つは、N-S 式および拡散方程式について平均流速を基本解に取り込んだ BEM 手法である。解析対象として A 貯水池をとりあげ、室内水理模型を作成して、実験実測値と BEM 解析結果とを比較することにより、BEM 流れ解析手法の収束性と精度を検討する。

2. 貯水池水理模型実験装置概要 A 貯水池を想定した水理模型実験装置の概要を図 1 に示す。現地の貯水池長さ 2500m, 平均幅員 230m, 平均水深 22m の領域を x, z 方向それぞれ約 3.22m, 0.44m とし、水平縮尺 1/775, 鉛直縮尺 1/62, 幅員 0.3m の歪模型である。流入口より流速 0.01m/s で流入させ、旧工用道路がある場合とない場合の 2 パターンで流れの可視化をおこなった。流れの可視化については、アルミニウム薄片が浮遊した模型装置を暗室化した実験室内でストロボ照射し (4Hz)、デジタル VTR で毎秒 4 コマ流跡を撮影している。

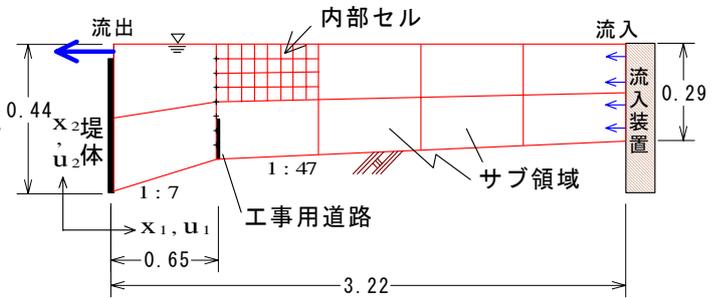


図 1 貯水池水理模型実験装置と解析領域

3. 基礎式

3.1 ペナルティ法 N-S 式を用いて流れを解析する場合には連続の式をうまく取り込むことが必要となるが、連続の式には圧力 (P) 項を含んでいないので容易ではない。この対策の一つとして、BEM にペナルティ法を適用している[文献 1]。即ち、式(1)に示すように大きな値 (10⁶程度) を持つ係数 K と連続の式左辺項との積を P と置く。P は有限の値をもつから、連続の式左辺項はゼロに近い値となり、流れの連続性を満足する。また、式(1)を式(2), (3)へ代入することで N-S 式から圧力項が消去される。圧力項が消去できるので、定義することが容易ではないところの圧力に関する境界条件を考慮しなくてもよいメリットが生じる。

$$P = K \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \nu \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} - \nu \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + g \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_1 \frac{\partial C}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial C}{\partial x_2} - D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x_2^2} \right) = 0 \quad (4)$$

3.2 平均流速の基本解への取り込み 通常の BEM では N-S 式および拡散方程式を解く場合に移流項を領域積分で取り扱っており、このため粘性係数や拡散係数が小さくなると BEM 解が不安定となる。この対策として次の工夫をしている。①解析領域をサブ領域 (十数個~数十個) に分割する。②各サブ領域に内部セル (十数個程度) 設けて流速を平均流速 \bar{u}_i とその補正量 Δu_i に分ける。③この平均流速 \bar{u}_i を BEM の基本解に組み入れる[文献 2]。

$$u_i = \bar{u}_i + \Delta u_i \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

このような工夫により粘性数や拡散数が小さい場合に BEM 解の安定性を向上させる。ここに用いる基本解は定常の場合で示せば式(6),(7)となる。ここに、 ν, D は動粘性係数、拡散係数であり、 (x_{1p}, x_{2p}) はチャージ点の座標である。

$$u^* = -\frac{\ln r}{2\pi\nu} \exp \left\{ -\frac{\bar{u}_1(x_1 - x_{1p}) + \bar{u}_2(x_2 - x_{2p})}{2\nu} \right\} \quad (6)$$

$$C^* = -\frac{\ln r}{2\pi D} \exp \left\{ -\frac{\bar{u}_1(x_1 - x_{1p}) + \bar{u}_2(x_2 - x_{2p})}{2D} \right\} \quad (7)$$

4. 実験結果

模型実験装置に一定の流量で水を流入させた場合、図2・図3の両方で流入口付近では穏やかな流れがみられたが、流出口付近では上層にのみ速い流速が観測され、堤体に近い低層部より流れが小さくなった。また図3の工事用道路付近で上に向かう流れが観測でき、堤体から工事用道路の間では回転流が確認できた。

5. BEM解析の結果

図4では、流入口から一定の距離までは緩やかな流れを示していますが、底面勾配が変化した辺りから小さな流れになっている。

また図5では、工事用道路の上部では流速が速くなっており、工事用道路を越えた後、中層から低層に潜り込むような動きを見せ、流出口に向けて流速が速くなっている。

6. 模型実験とBEM解析との比較

工事用道路を設置した場合と、設置しなかった場合の両方で模型実験とBEMによる解析の結果を比較しましたが、流入出口の周辺や低層部などでは実験で得られた流れと解析の結果が酷似しています。特に工事用道路周辺では似たような流れがみ、堤体から工事用道路までの低層部での非常に小さな流れまで再現できた。

7. 移流拡散解析 ここでは、溶存酸素 (DO: O₂ mg/L) 濃度BEM解析を示している。ペナルティ法で求めたBEM流れ解析結果を流速値として入力し、平均流速をBEMの基本解に組み入れた手法を用いている。DOの境界条件としては、堤体から工事用道路を挟み0.9mの区間の底面にDO濃度ゼロの条件を与え、移流拡散解析を行った。その他の底面および水面にはDO濃度10を境界値としている。図6に示す濃度分布BEM解は妥当な結果となっている。

8. まとめ

本報では同一の対象領域に工事用道路の有無による二種類のケースを実験・解析する事ができ、全体的な流跡と低流速でのスムーズかつ合理的な流れが表現でき、ペナルティ法を盛り込んだBEMの有用性が示す事ができました。現在、ダム底層部に貧酸素水改善の為に気液溶解装置を設置した場合に貯水池全体の流動と拡散へ及ぼす影響に関する数値解析について検討中です。

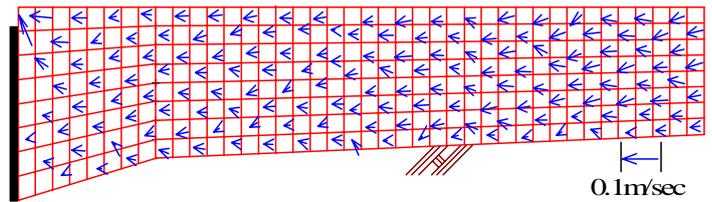


図2 模型実験装置による流れ 工事用道路なし

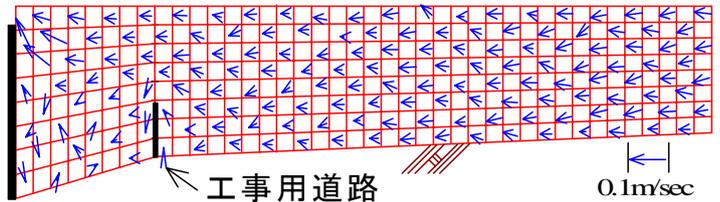


図3 模型実験装置による流れ 工事用道路あり

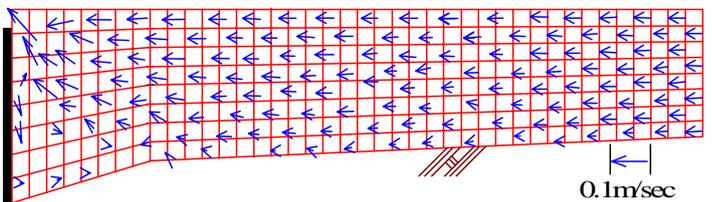


図4 BEM解析による流れ 工事用道路なし

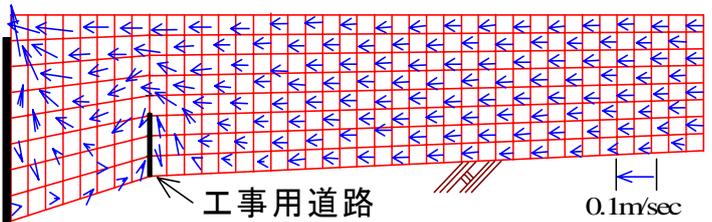


図5 BEM解析による流れ 工事用道路あり

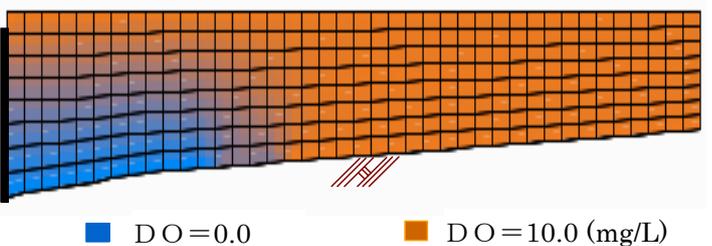


図6 BEM解析による移流拡散解析 工事用道路なし

参考文献

[1] Kanoh, M., Nakamura, N. and Kuroki T., Flow analysis in a water reservoir using a combined boundary element and weighted finite difference method, *Proc. of the 27th World Conf. on Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods*, ed. C.A. Brebbia, WIT PRESS, Orlando, USA, pp. 429-438, 2005.

[2] Kanoh, M., et. al., Coupled Boundary Element Method for Salt -water Wedge Diffusion with Constant Convective Term, *Proc. of the 2nd China-Japan Symposium on Boundary Element Method*, eds. Q. Du & M. Tanaka, Tsinghua University PRESS, pp.189-196, 1988.