

中小都市河川に設置された側岸凹部構造物の 非構造格子有限体積法による影響評価

EVALUATION OF SIDE CONCAVITY STRUCTURE INSTALLED IN URBAN RIVER USING FINITE VOLUME METHOD WITH UNSTRUCTURED GRID SYSTEM

藤田一郎¹・椿涼太²
Ichiro FUJITA and Ryota TSUBAKI

¹正会員 学博 神戸大学助教授 都市安全研究センター (〒655-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科前期課程 (〒655-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

A new two-dimensional simulation model for urban rivers applicable to complicated sidewall geometry was developed. The proposed model is based on the finite volume method (FVM) with flux differencing splitting (FDS) under unstructured grid system. Firstly, the performance of the model was evaluated by the comparison with experimental results for a straight open-channel with a long side concavity having an aspect ratio of ten. The calculated results showed fairly good agreements with the experiments, indicating the good performance of the model. Secondly, the model was used to examine the effects of various sidewall geometries on the local water-level increase at the side concavity section. It was shown that water depth variations within the side concavity section can be controlled by a separation wall and the optimum arrangement of the separation wall for the present side concavity shape was proposed.

Key Words : *finite volume method, unstructured grid, side concavity, river side structure, depth-averaged simulation, urban river management*

1. まえがき

河川の管理や計画はさまざまな流況を想定して行う必要がある。大降雨時に溢水や破堤せずに河口まで流下させることはもちろん、近年では低水位時の水位や水質を確保することが、環境や親水性等の視点から注目されるようになってきた。このような傾向は平成9年に改定された河川法にも組み込まれて、河川改修や管理の新しい課題として、全国に浸透してきている。このことから、住民の生活へよりよい影響をあたえるべく、新しい河川像の模索が進められているのが現状である。これによって、従来の計画や設計では考慮されてこなかった視点があたらしく増えることになり、河川設計はより複雑になりつつある。例えば、今までは平面的なコンクリート三面張りといった画一化された設計が広く行われてきたが、これからは、河道断面形に様々な変化をつけることで、低水位時にも水のもつ躍動感を感じさせたり、魚類や昆虫等が活動できる場を取り戻したりすることも考慮した設計を行う必要がある。また、水面への安全なアクセシビリティを確保することで、住民が河川と直接的に接する機会を提供し、川への親しみを回復し、環境意識の共有を促すことも重要である。

しかし、このような親水性を高める設計や環境を配慮した設計は、まだ十分な歴史や、経験の蓄積がないために、このような設計が及ぼす長期的な影響は明らかでなく、十分な流況の把握はできていない。したがって、様々な周辺環境や現在の河道状況をふまえ、それぞれの場にあった注意深い設計を個々に行っていくことが大切である。

このような現状に鑑み本研究では、より複雑化した形状を持つ河川の流れを詳細かつ総合的に理解し、予測できる手法の確立を試みた。この手法によりさまざまな河道形状が流れに及ぼす影響をあらかじめ予想できれば、設計の合理化に利用できる。本研究では、河川の平面形状を比較的自由にあたえられる非構造格子を用いた数値シミュレーションモデルを開発し、拡幅部をもつ都市河川を対象にして、実験結果や構造格子を用いたシミュレーションから得られた値¹⁾²⁾との比較検討を行った。拡幅部を直角とした場合は、二次元キャビティ流れとなり、せん断不安定による非定常性などについての研究がなされてきた³⁾⁴⁾。しかし親水性を配慮する場合に、単純な矩形構造が望ましいといえず、またこの形状が安全面で最適であるとはいえない。そこで、拡幅部の設計変更が流況におよぼす影響の評価にこの非構造格子モデルを利用

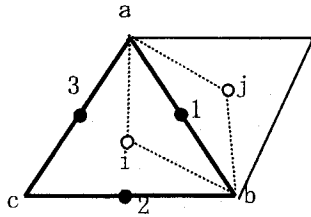


図-1 セル近傍の定義図

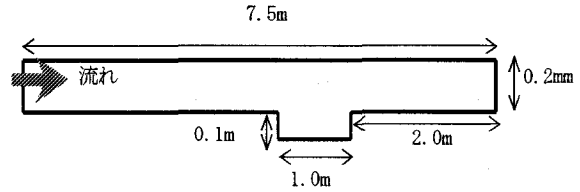


図-2 実験水路

した。

2. 数値モデル

(1) 基礎式

基礎式として用いたのは平面二次元流れの連続式と運動方程式である^{5,6}。これをベクトル表記で示したものが以下の式(1), (2)である。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S + d_h \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$F = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ -gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ uh \\ vh \end{pmatrix}$$

ここに、 h :水深、 u, v : x, y 方向の平均流速、 g :重力加速度、 d_h :渦動粘性係数である。 S_{0x}, S_{0y} は x, y 方向の河床勾配で以下の式で与えられる。

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (3)$$

底面摩擦勾配 S_{fx}, S_{fy} はManningの抵抗側を利用した以下の式を用いた。

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (4)$$

(2) 基礎式の積分

基礎式を任意の検査体積 Ω で積分すると、次の積分型の浅水方程式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_{\Omega} (E dx + F dy) d\Omega + \int_{\Omega} S d\Omega + \int_{\Omega} d_h \left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) d\Omega = 0 \quad (5)$$

つぎに移流項、拡散項にグリーン・ガウスの発散定理を用いて面積積分を境界での線積分に置き換える。

(3) 離散化

h, u, v は各セルの中心上で定義し、解の安定化のため、流束、発生・消滅項の離散化の際にFlux Difference Splitting(FDS)法を用いた⁵。この方法は、セル境界上の値を、セル中心の値を用いて一次風上化するものである。拡散項については、以下のように離散化した⁷⁾。ここで $\partial\Omega$ は検査体積の境界を表す。

$$\int_{\partial\Omega} d_h \left(\frac{\partial G}{\partial x} dy - \frac{\partial G}{\partial y} dx \right) dL = d_h \left(\left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_1 \Delta y_{ab} + \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_2 \Delta y_{bc} + \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_3 \Delta y_{ca} \right) - d_h \left(\left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)_1 \Delta x_{ab} + \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)_2 \Delta x_{bc} + \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)_3 \Delta x_{ca} \right) \quad (6)$$

ここで、たとえば $\Delta x_{ab} = x_b - x_a$ である。図-1にセルabc近傍の定義図を示すが、このセル境界上の点1,2,3上での $\partial G/\partial x, \partial G/\partial y$ を得るために、例えば点1についてはajbiという領域を対象としたFluxの出入りを考えて、以下のように離散化する。

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)_1 = \int_{ajbi} \frac{\partial G}{\partial x} dS / A_{ajbi} = [(G_a + G_j) \Delta y_{aj} + (G_j + G_b) \Delta y_{jb} + (G_b + G_i) \Delta y_{bi} + (G_i + G_a) \Delta y_{ia}] / 2 A_{ajbi} \quad (7)$$

$\partial G/\partial y$ も同様にして離散化する。セルの頂点a,b,cにおける G の値は接するセル中心での値の重みづけ平均から求めた。

(4) 境界条件

上流端では流量を与えた。そのために、水深から流水断面積を求め、これに応じて流速分布を与えた⁶⁾。下流端では水位を与えた。また、壁面は滑り無し条件とした。

(5) 拡散係数

流れに及ぼす渦の影響は渦動粘性係数 $d_h = \alpha h u_*$ によって評価した。ここに、 α は定数、 u_* は摩擦速度である。また、壁面近傍での渦の挙動を考慮して、減衰関数によって、渦粘性係数を調節した³⁾⁸⁾。

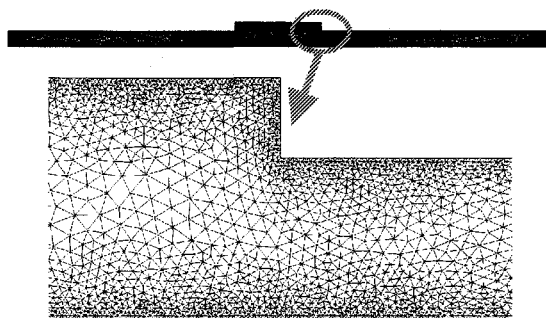


図-3 計算格子

3. 計算モデルの適用性の検証

計算モデルの適用性検証のため、著者らの行った拡幅部をもつ水路実験²⁾を対象に再現計算を行った。実験の概要は以下のである。

実験条件は、神戸市内の都市河川を参考に河床勾配を1/250とした。流量は $0.01\text{m}^3/\text{s}$ とし、拡幅部を設けない場合に等流状態となるよう下流端水深を調節した。実験水路(図-2)は主流部の水路幅0.2m、長さ7.5mの循環式可変勾配開水路で、水路の中間部に幅0.1m、長さ1.0mの拡幅部を取り付けてある。水深の計測はデジタルポイントゲージを用い120点で行った。流速の計測は、 $20\mu\text{m}$ のナイロン破碎粒子をトレーサーとし表面流を可視化してデジタルビデオカメラ (SONY DCR-VX1000) で撮影したのちに、得られた画像に対しPIV解析を行っている。

計算に用いる非構造格子は三角のセルを水路境界周辺に集中させた格子を生成しこれを利用した(図-3)。セル数は約2万で、壁面境界部でのセルの辺長は5mmとした。格子生成は、境界から内側に向けてセルを生成する、アドバンシングフロント法⁷⁹⁾を利用し、生成するセルの大きさを調整することで、疎密を調節した。また、この方法では格子生成が進んだ際に歪んだ領域が発生するためこれを緩和するよう調整を行った。比較のために用意した構造格子での計算には移流項にCIP法を用いたモデルを利用した¹⁾。以下では、ベクトル分布特性から流れの構造を確認し、また計算値の再現性を確認するため、実験値と水深分布の比較を行った。また特徴的な流れの位置を図-4に示す。実験値は1分、計算値は30秒の平均である。

(6) 速度の分布特性

流速分布の比較を行ったものを図-5, 6, 7 (上) に示す。実験値が表面流速であるため直接的な比較はできないが、以下のような流況は把握できた。まず、主流部の流れは拡幅部上流端(図-4でのA、以下同様)で剥離した後、拡幅部に向かって拡散流入する。その後、拡幅部下流端(B)に向けて収縮し、下流端の下流側での加速部分(C)を

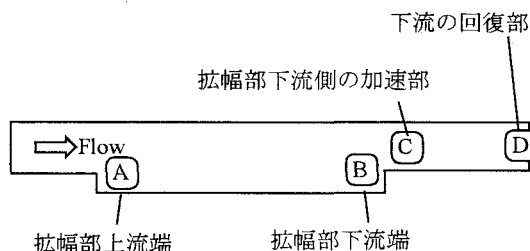


図-4 特徴的な流れの発生箇所

経たのち一様な直線水路の流れに回復(D)する。拡幅部(A-B間)には両計算で比較的是っきりした逆流が確認できるのになら、実験値(表面流の平均値)には逆流がほとんど見られない。念のために水面下における水平断面内の可視化を行ったところ、表面よりも強い逆流域の存在を確認できたため、水深平均的には良好な結果が得られている。また、実験値では(C)の部分に衝撃波に起因する不連続な速度分布が得られているが、水深平均流れを扱っている本計算ではその再現はできていない。なお、構造格子の計算で流入部や対岸の壁面付近での流速低減が十分でないのは、壁面付近の格子密度が十分でなかったためである。

(7) 水深の分布特性

水深の予測は河道の設計においてもっとも重要な事項である。図-5, 6, 7 (下) に水深の実験値ならびに計算値の分布を示す。実験結果(図-5)をみると、拡幅部下流(図-4のB)での側壁を中心とした水位上昇と拡幅部下流端後方(C)の局所的な水位低下が特徴となっている。これらの特徴は両計算値でも確認できる。水深の分布特性にはやや違いがみられ、構造格子では流下方向に直角な広がりが見られる一方、非構造格子では横断方向に高低が広がっている。これは、構造格子で用いたCIP法と非構造格子で用いたFDS法との数値粘性の特性が異なっていることが原因と思われる。B, C付近の再現性については、非構造格子の方が実験値に近い結果を与えているようである。

(8) フルード数の分布特性

次に、拡幅部下流端付近(B)での水位上昇とそれに続く水位低下部分(C)について注目してみる。この部分では、流れが局所的に射流となる複雑な流れがみられる。この付近でのフルード数の分布を示したものが図-8, 9である。本モデルでは常射流が混在した流れ場の解析が可能であり、計算値でも局所的な射流域が計算されている事がわかる。射流域が対岸まで到達し、そこで反射して戻ってくる様子が良好に再現できている。

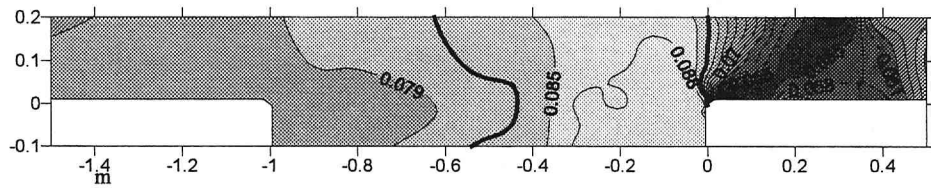
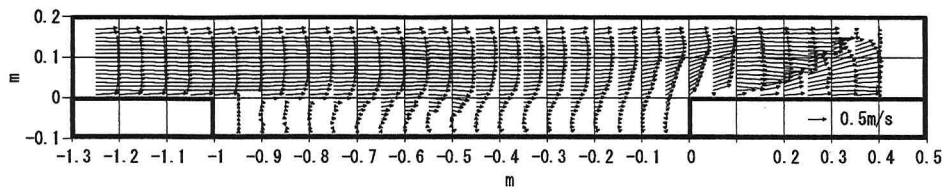


図-5 実験値 上：流速(表面流)，下：水深

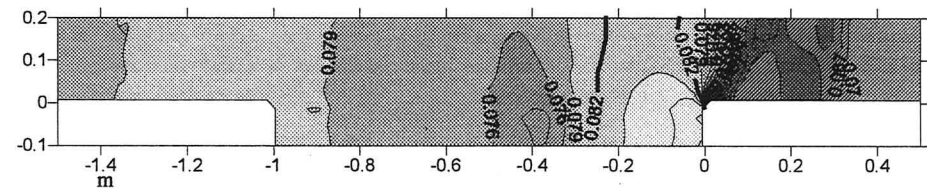
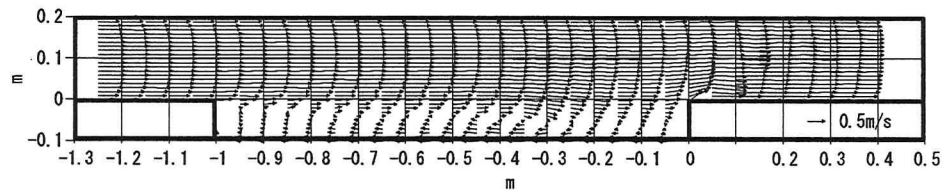


図-6 非構格子による計算値 上：流速，下：水深

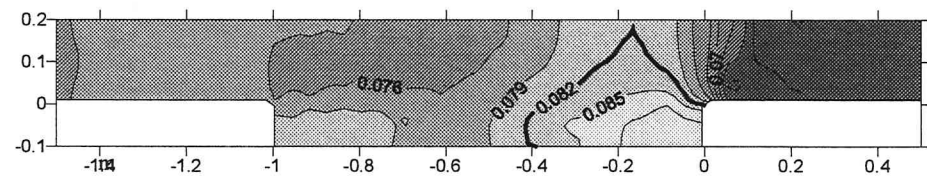
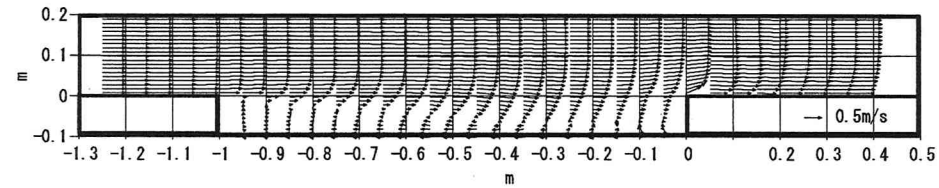


図-7 構格子による計算値 上：流速，下：水深

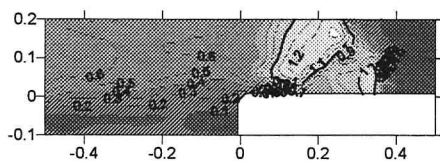


図-8 実験値のフルード数の分布

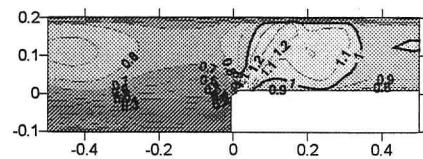


図-9 非構格子によるフルードの分布

4. 河道設計評価への適用

以上の検討から、拡幅部を有する流れに対する本モデルで三次元性の強い現象に対しては再現できなかったが、平均的な流況については妥当性が確認できたので、次に親水性確保のために設置するこのような拡幅部の形状を変化させ、水位上昇量を抑制する方策について数値的な

検討を行ってみた。

(1) すり付けの追加

一般的には側岸の形状をなだらかにすることで流れがスムーズとなり、水位上昇の問題を抑えることができると考えられるため、まずこのような形状変化について検討した。これは拡幅部の上下端にすり付けを設置するこ



図-10 すり付けの拡幅部流れへの影響

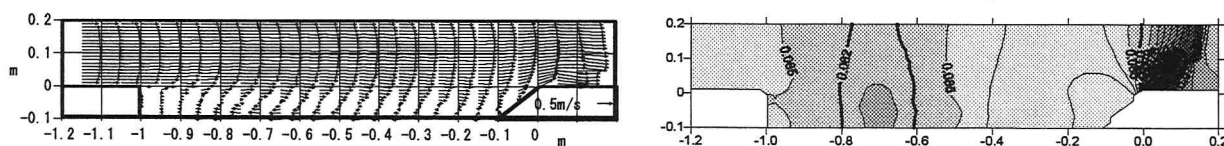


図-11 すり付け追加 (計算値) 左: 流速, 右: 水深

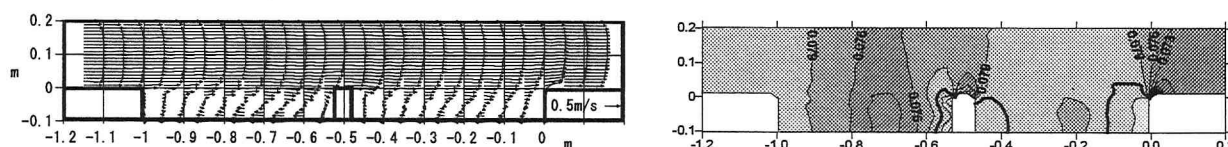


図-12 隔壁ケース 1 (計算値) 左: 流速, 右: 水深

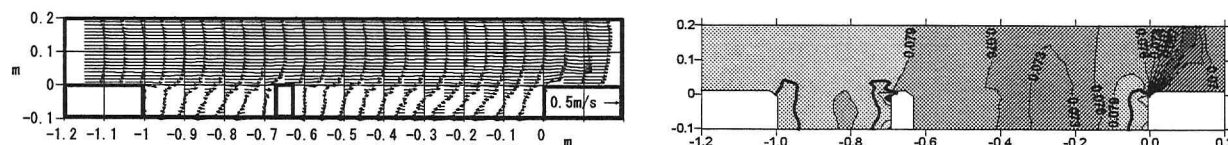


図-13 隔壁ケース 2 (計算値) 左: 流速, 右: 水深

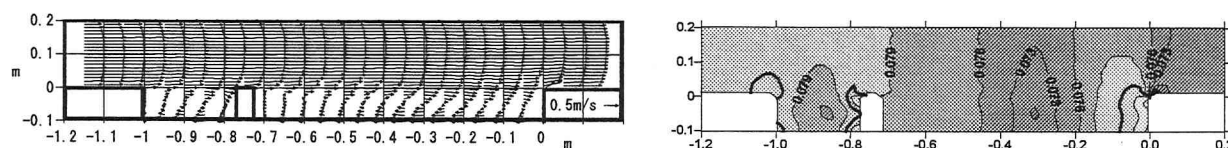


図-14 隔壁ケース 3 (計算値) 左: 流速, 右: 水深

とで実現できる(図-10)。この場合の計算による水深と速度の分布を示したものが図-11である。これによれば、側岸凹部下流側で局所的な水位上昇部が現われている。この水位上昇は、すり付けの設置によって再循環領域が縮小し、すり付け区間($x=-0.1 \sim 0$)へ主流が直接衝突することによるセキ上げ効果が原因と考えられる。ちなみに上流部にもすり付けを設置したシミュレーションも試みたが、この場合にはさらに水位上昇が引き起こされた。実験データとの比較をまだ行っていないため断言はできないが、少なくとも本解析からはすり付けでは治水上の効果が期待できないという結果になった。そこで、主流の流れが拡幅部に拡がらないように制御することで、水位上昇の問題が解消に向かうことが予想されたため、次に示す隔壁の追加を試みることにした。

(2) 隔壁の追加

隔壁の配置にはさまざまな方法が考えられる。これは水制の設置された流れ¹⁰⁾と共通性をもっているが、想定している規模や流れは異なっている。ここでは、水面へのアクセシビリティや側岸からの視認性を優れると考え

られる、主流方向の直角に配置した場合の、設置位置と流況の変化について検討を行った。

今回検討したのは、拡幅部の上流から1/2, 1/3, 1/4の位置に設置したケース1, 2, 3である。水深と速度の分布を図-12, 13, 14に示す。また、断面平均水深の縦断図を図-15に、断面最高水位の縦断図を図-16に示す。x軸付近の記号は、それぞれのケースで隔壁が設置された場所を示す。これらの結果から共通して見られたのは、拡幅部下流端や隔壁上流側に見られる水位上昇と、その上流に見られる大規模な循環渦に起因する水位低下領域の存在である。どのケースでも拡幅部下流端付近の水位上昇が隔壁を設置することで抑えられているが、特徴的なのはケース1とケース2、3とでは主流の水位上昇部の位置が逆転している点である。図-15, 16から確認できるように隔壁付近での水位上昇量に着目するとケース1, 2に比べ、ケース3では拡幅流端の水位低下効果をもちつつ、隔壁付近での水位上昇が比較的小さくなっており、この中では最適な配置と思われる。

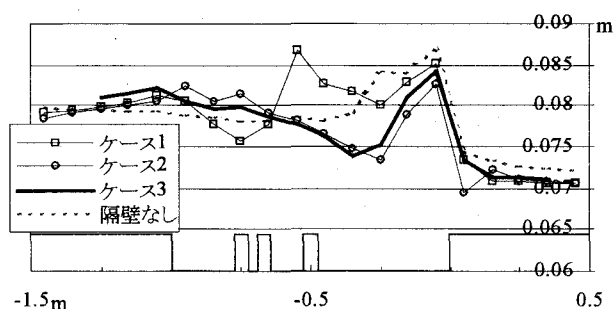


図-15 断面平均水深の縦断図

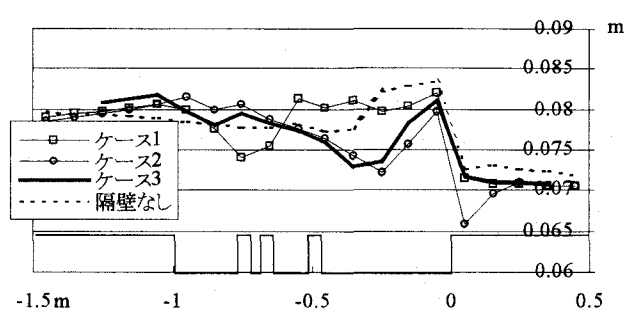


図-16 断面最高水位の縦断図

5. あとがき

本研究では、今後増加すると考えられる、親水空間などが含まれる複雑な河道形状における流れを検討するために、非構造格子を用いた流況シミュレーションモデルを開発した。まず、単純な拡幅部を持つ水路での実験値との比較によって本手法の有効性を確かめた後、この流れ場での特徴的な水位上昇を抑制するための方策について検討した。その結果として、隔壁設置の有効性を確認するとともに、隔壁の最適な配置法を提案した。ただ、今回開発した数値モデルは、風上差分がベースとなっているため数値粘性の影響は無視できない可能性があり、実験値との比較により再評価する必要がある。ただ、非構造格子を採用したため、ここで取り扱っているような直線水路だけでなく、さらに複雑な平面形状を有する河道や構造物などへの適応が容易に行える。今後は、モデルの高精度化を図るとともに、実河道への適用を通してモデルの信頼性と実用性の向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 藤田一郎, 小澤純, 長浜弘典: 直線水路に設置された側岸凹が主流に与える影響について, 応用力学論文集, Vol.4, pp.549-556, 2001.
- 2) 藤田一郎, 小澤純, 川本尚紀: 直線水路に設置された比較的長い側岸凹部に関する実験的研究, 神戸大学年安全研究センター研究報告, 第6号, 2002.

- 3) 木村一郎, 細田尚: 側岸に死水域を有する開水路流れの非定常解析, ながれ, Vol.12, pp.399-408, 1993.
- 4) 瀬津家久・鬼束幸樹, 矢野勝士: 側壁に凹部を有する開水路流れのLES解析, 水工学論文集, Vol.46, pp.403-408, 2002.
- 5) 重枝末玲, 秋山寿一郎, 浦勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, Vol.45, pp.895-900, 2001.
- 6) 長田信寿: 流路変動過程の数値解析法とその応用に関する研究, 京都大学博士論文, 1998.
- 7) Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T.: COMPUTATIONAL FLOID DYNAMICS FOR ENGINEERS, Vol. II, EES, pp.265-2911, 1993.
- 8) 梶島岳夫: 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂出版, 1999.
- 9) 金子宗嗣, メンショフイゴール, 中村佳朗: 名古屋大学大型計算機センターライブラリープログラム使用法説明書, 2000.
- 10) 木村一郎, 細田尚, 音田 慎一郎, 富永 晃宏, 武田 誠: 斜め不透越流型水制周辺の流れ構造に関する三次元解析, 土木学会第57回年次学術講演会, II-107, 2002.

(2002. 9. 30受付)