

取水路内流況の数値解析と実験結果の比較

Comparison of analysis and experiment for flow in intake channel

熊谷洋, 佐々木牧夫, 三瓶隆雄

By Yo KUMAGAI, Makio SASAKI and Takao SANPEI

To promote time and effort savings and to increase efficiency in experimenting with water-flow installations, the practical use of numerical simulation has been studied. The velocity distribution at the intake structure of hydraulic model, was compared using numerical simulation data and one dimensional LDA measurements. The numerical simulation data of the velocity distribution just downstream of the channel curve in the gradually widening of the channel was in good agreement with the results obtained by measurement except the area of strongly unsteady flow

Keywords: intake channel, velocity distribution,
3D numerical simulation, turbulence model

1. まえがき

水理構造物を設計する場合、水路内の流況を把握することは重要であり、模型水路を用いて数多くの水理模型実験が行われている。しかし、水理模型実験は模型製作、改造、計測など多大な労力を必要とする。また、水理模型実験の実験工数、費用、計測にかかる手間など勘案すると模型実験から得られる情報には限りがある。

現在、コンピューターの飛躍的な進歩によりEWS (Engineering Work Station) レベルでかなり実用的な数値シミュレーションを行うことが可能になってきている。数値シミュレーションは、

- (1) 最適設計のアプローチ
- (2) 経済性の向上
- (3) 実験で再現できない条件の解析

などの利点があり、土木の水理設計分野においても将来的に活用が拡大されていくものと考えられる。実際の水理構造物を対象にした数値シミュレーションでは、女川原子力発電所2号機復水器冷却用取水路に対し、

*	正会員	工修	東北電力株式会社	研究開発センター
	(〒981		宮城県仙台市青葉区中山7丁目2番1号)	
**	正会員		東北電力株式会社	土木建築部 土木運営グループ
	(〒980		宮城県仙台市青葉区一番町3丁目7番1号)	
***	正会員		株式会社	東北開発コンサルタント 技術部
	(〒980		宮城県仙台市青葉区上杉2丁目3番7号)	

氏家・佐々木¹⁾によりおこなわれたものや、藤井らが曲がり有する放水路に対して行われたものが報告されている。また、実際の水利構造物の設計に数値解析が使用された事例として、熊谷²⁾らが沈砂池の最適設計形状に対して、藤井ら^{3), 4)}が柏崎原子力発電所放水路流れに対して、水利構造物周辺部以外の流れ場として石野⁵⁾らが明石海峡大橋の橋脚まわりの主流に対して行われている。

今回、水利模型実験の省力化および設計の効率化・最適設計のアプローチを目的に数値シミュレーションの導入・実用化を図るために女川原子力発電所2号機復水器冷却用取水路の水利模型を対象に3次元数値シミュレーションを行い、数値シミュレーション結果と実験結果との比較・検証を行うものである。

2. 水利模型概要

2. 1 対象水路

今回、対象とした水路は女川原子力発電所2号機復水器冷却用取水路の水利模型であり、その概要を図-1に示す。模型縮尺は1/25のfroude模型で取水口部分にあたる調整池は給水による影響が水路内に及ぼさないよう多孔式整流板を設置することにより表面波が水路内に伝播しないようにした。下流側でポンプにより水を汲み上げ、流量測定用の三角堰により流量測定後、地下水槽に還元する。なお、水路模型は中間部ピアを除いて透明アクリルを用いて製作することによりレーザー流速計を用いて水路外から間接的に測定できるようにした。

2. 2 現状水路の問題点

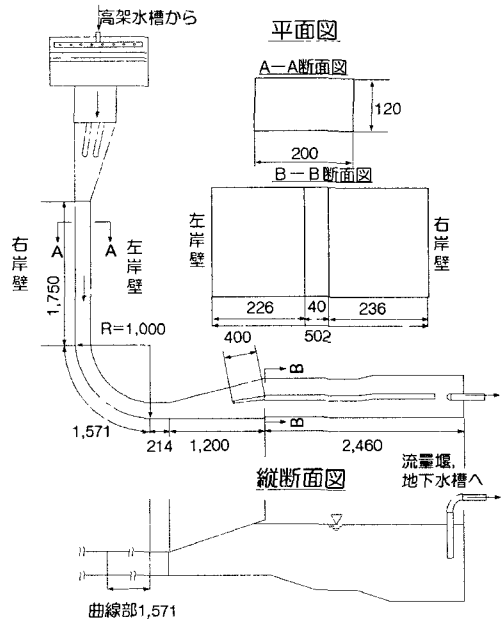
原案は今回対象となる水路の特徴は、直線部、90度の曲線部(曲率半径1m)、および水深、水路幅方向に暫拵部を有する水路構造物である。

水路構造物の形状から曲がりによる偏流、はく離領域の生成(隔離領域の付着の増大)、逆流域および循環流の発生などによりポンプ室2水路の流量配分の不均等化が懸念される。

実際の設計では、水路内中間ピアを20m延長することにより、ポンプ室内の流量配分は均等化され、はく離領域が解消されている。

3. 計測方法

流速測定は、DANTEC社製の一次元レーザー流速計(出力2w)を用いて行った。主流は図-2のように計測断面に対して垂直な方向の流れと定義した。主流の測定は、断面1から断面29までの合計6,000ポイントに対して計測断面に垂直な成分の1次元計測で測定間隔0.01秒、60秒間連続測定で行った。主流の流速成分データは、計測で得られた60秒間連続測定の流速データを平均化したものを用いた。



単位 (mm)
図-1 水利模型概略図

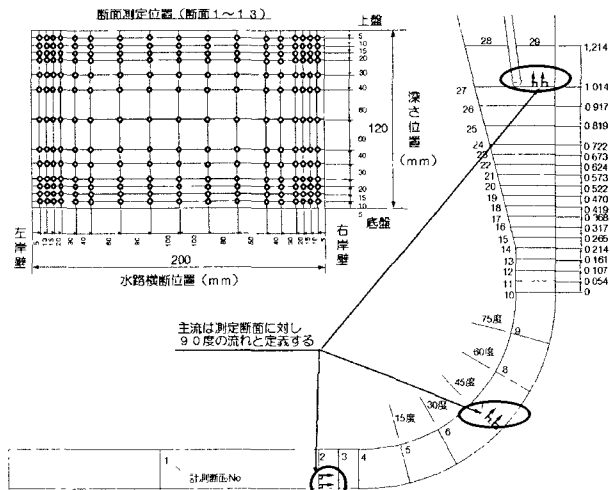


図-2 LDV計測ポイント

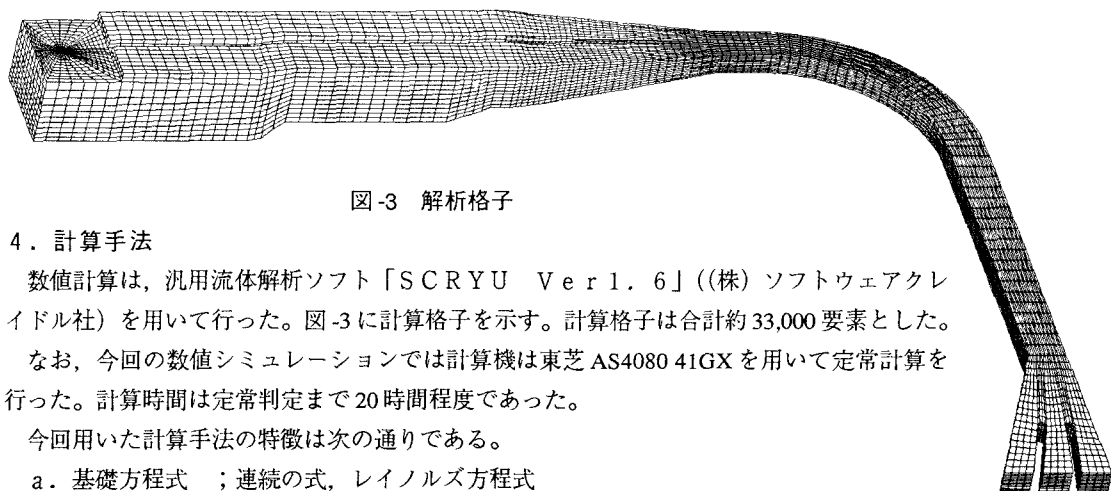


図-3 解析格子

4. 計算手法

数値計算は、汎用流体解析ソフト「SCRYU Ver1.6」((株)ソフトウェアクリエイドル社)を用いて行った。図-3に計算格子を示す。計算格子は合計約33,000要素とした。

なお、今回の数値シミュレーションでは計算機は東芝 AS4080 41GXを用いて定常計算を行った。計算時間は定常判定まで20時間程度であった。

今回用いた計算手法の特徴は次の通りである。

- a. 基礎方程式 ; 連続の式, レイノルズ方程式
- b. 格子系 ; 非構造格子
- c. 離散化法 ; 有限体積法 (FVM)
- d. 差分スキーム ; 移流項/3次精度風上差分
乱れエネルギー k , 乱れエネルギー散逸率 ϵ , 圧力 p /1次風上差分
- e. 乱流モデル ; 標準 $k-\epsilon$ モデル
- f. 壁面条件 ; 自由水面部分/すべり壁, その他壁面/管水路対数則
- g. 乱流定数 ; Launder-Spalding⁽⁶⁾ が提唱する値を使用
- h. 流入流出条件 ; 流入条件/流入断面に対し 9.6 (l/s), 流出条件/流出断面に対し 9.6 (l/s)

5. 実験データとの比較検証

5.1 解析結果概要

図-4に取水路暫拡部付近の数値シミュレーション結果を示す。取水路曲線部直下流は遠心力により偏流している。暫拡部開始地点より10cm程下流部からはく離領域が発生し、下流部にいくにつれてはく離が発達している。取水路暫拡部はセンターピアにより2つに分割されているが、図-4に示すとおり分割されている水路の一方は完全なはく離領域すなわち逆流域になっており、センターピアからポンプ室の間に大規模な循環流が定常的に生じている。また、センターピア上部にはセンターピア厚の変化と曲がりにより小規模な逆流域が見られ、センターピア下部には、主流とポンプ室より戻る循環流が合流することにより、偏流の程度が大きくなることにより小規模な逆流域が生じている。暫拡部流況をさらに複雑にしている。

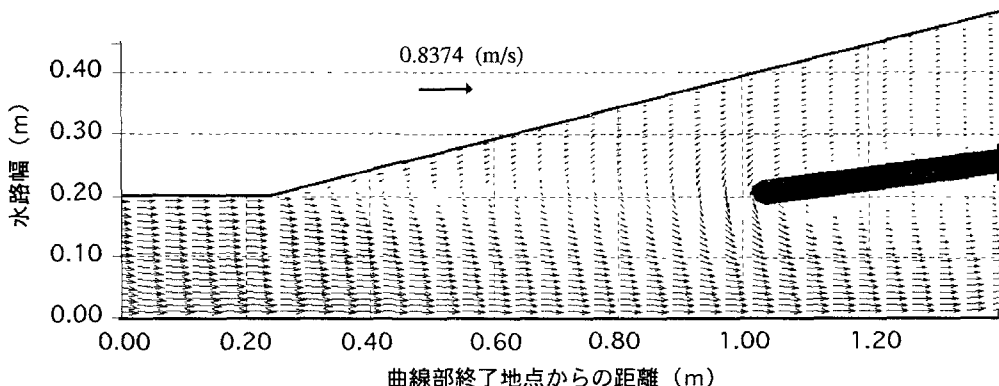


図-4 暫拡部流況 (数値シミュレーション結果)

5. 2 取水路平面方向の取水路暫拡部流況比較

図-5に取水路暫拡部の平面方向の実験結果と数値シミュレーション結果の比較を示す。なお、比較断面は取水路管断面の重心高さである。

図-5よりはく離領域の発生地点は実験結果と数値シミュレーションを比較するとほぼ一致している。はく離領域の開始地点からセンターピア先端までのはく離領域の発達状況は数値シミュレーションの方がやや大きい。取水路の曲がりにより発生する偏流の流速分布は実験結果と数値シミュレーション結果を比較するとほぼ同様な傾向を示した。

また、センターピア周辺部流況は、センターピア上部において数値シミュレーション結果と実験結果と比較するとやや異なる結果を示した。これは、数値シミュレーションではセンターピア厚の変化と曲がりによるはく離が計算されているのに対し、実験では、センターピア周辺は図-5よりピアがやや左下方に屈曲している影響で屈曲部より小さなはく離渦が発生、移動および消散しているため、非定常性の強い流れ場になっており定常流として計測不可能であったため、センターピア上部の流速分布が数値シミュレーションとやや異なる分布になったものと考えられる。実験で確認されたセンターピア下部付近の小規模なはく離領域は数値シミュレーションで再現することができた。

5. 3 管断面の取水路暫拡部流況

図-6に断面15から29までの管断面の実験結果と数値シミュレーション結果の比較を示す。断面15, 19, 21に関して、分布形状は概ね一致している。しかし、数値シミュレーションで予測しているはく離の発生領域位置は、実験では水面近くに発生しているが数値シミュレーションではやや水中の方に発生している。水理模型は全てアクリル製であり、管内は一様に滑らかであり粗度の影響は考えにくいいため、はく離の発生領域の数値シミュレーション結果と実験結果の差異を説明する原因はつかむことができなかった。なお、各断

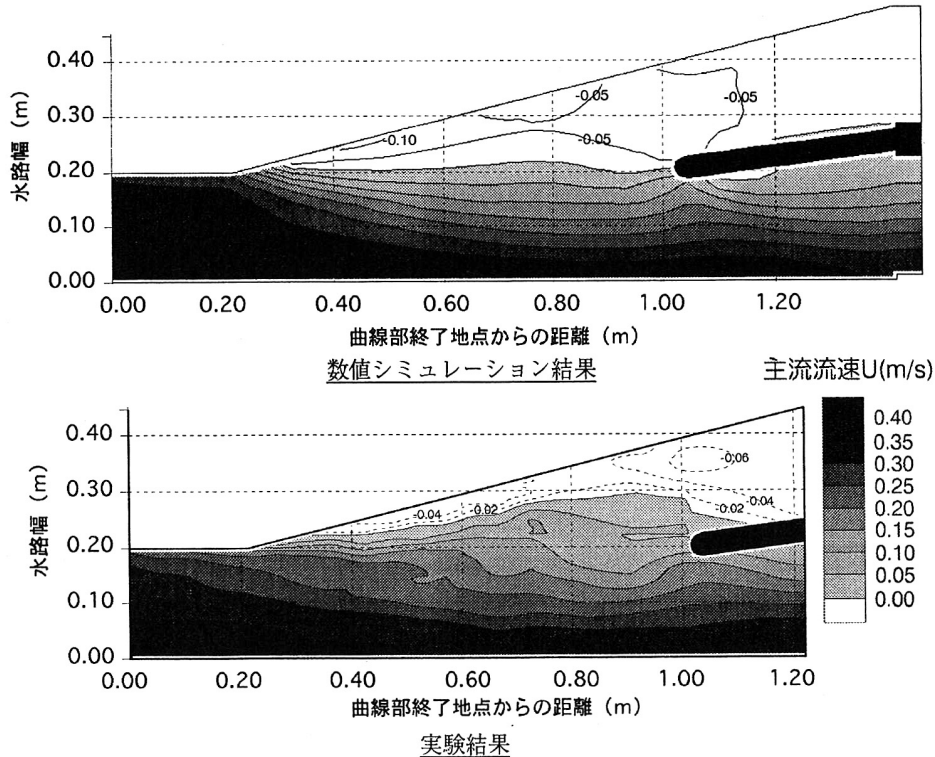
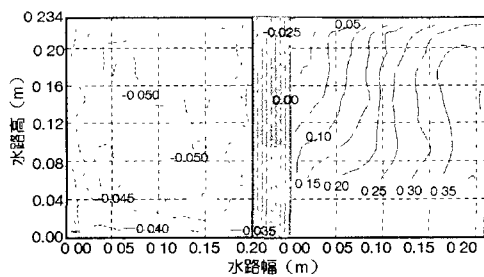
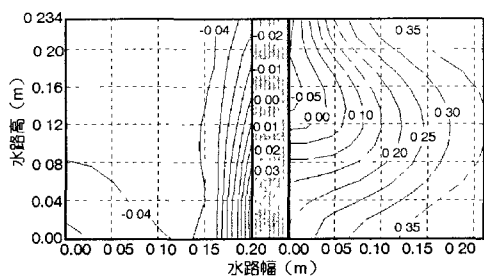
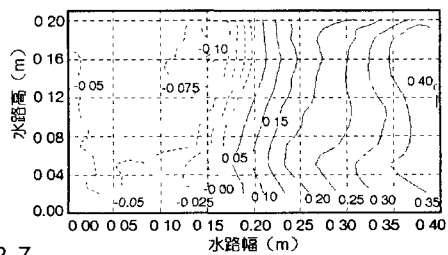
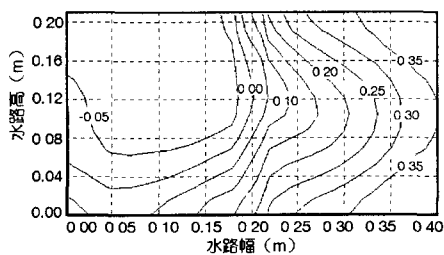


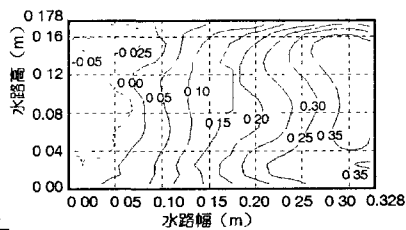
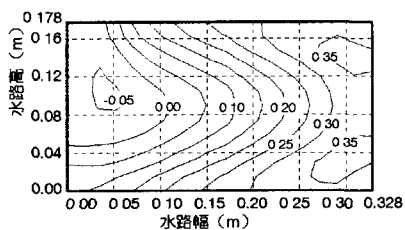
図-5 暫拡部流速分布の比較（水平方向）



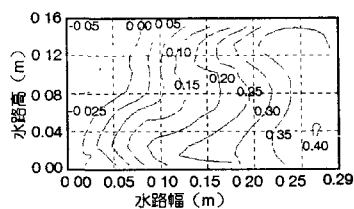
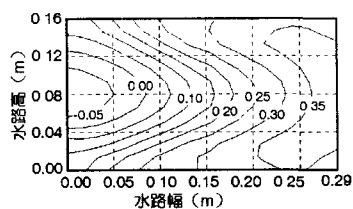
断面 28-29



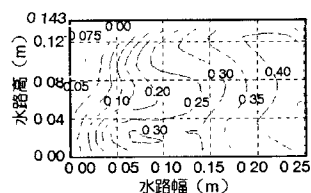
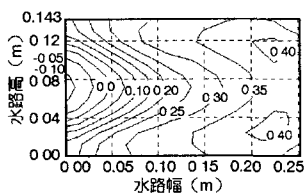
断面 27



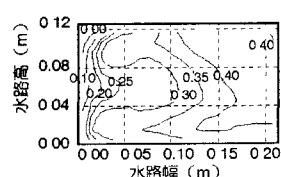
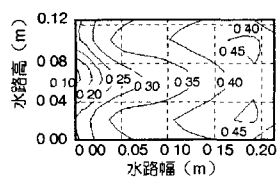
断面 24



断面 21



断面 18



断面 15

数値シミュレーション結果

実験結果

図-6 流速分布比較 (管断面)

面における流速の最大値と最小値もほぼ一致した。

断面24から29に関してははく離領域の流速分布形状は、実験結果と比べてやや異なる。これは、ポンプ室からの循環流の影響で暫拡部付近は極めて複雑な流況になっているものと考えられるために実験結果と数値シミュレーション結果に差異が生じたものと思われる。各断面における流速の最大値と最小値もほぼ一致した。

数値シミュレーションと実験結果を比較して、はく離領域の発生地点、任意断面における最大流速および最小流速、循環流、はく離の発生位置など数値シミュレーションで予想することができた。実際の水理構造物を設計する場合、これらの流れの発生の有無を検討することは極めて重要であるが、これらの流れの発生有無を事前に予測できることは事前設計にきわめて有効な情報を提供することになると思われる。

6. あとがき

今回、3次元数値シミュレーションを女川原子力発電所2号機復水器冷却用取水路の水理模型を対象に行った結果、次のような結果を得た。

- 1) 主流の平均流速分布は、逆流域が再循環する地点より上流では数値シミュレーション結果と実験結果とは概ね一致する。
- 2) 主流の最大流速と最小流速は、いずれの断面において数値シミュレーション結果と実験結果が一致する。
- 3) はく離の発生地点は数値シミュレーション結果は、実験結果よりやや下方にはく離領域の発生が見られたが、水平方向においては実験結果と数値シミュレーション結果がほぼ一致した。
- 4) 逆流域が再循環する地点より下流では、流速分布形状は数値シミュレーション結果と実験結果とやや異なる形状を示した。非定常流が卓越する領域においては数値シミュレーションと実験結果の一致を見ることは難しいと思われる。

今後の課題として、はく離、逆流域および非定常渦の発生が予想されるいわゆる非定常流れが卓越する流れ場の取り扱いに注意が必要であるためP I V等の導入によって、より高い精度で数値シミュレーション結果と実験結果を比較する必要がある。

数値シミュレーション技術に関しては、解析精度向上のために壁面の取り扱い方および自由水面の境界条件に関し、より一層の工夫が必要であるものと思われる。また、非構造格子は解析格子に解が依存する傾向があるため、解析格子の作成方法のより良い方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 氏家久芳・佐々木牧夫；流れの数値シミュレーションと水理模型実験との適合性—女川原子力発電所の例，電力土木，No235，1991年11月号，p45～p52
- 2) 熊谷洋，今井正寿，中井至知；3次元数値シミュレーションによる沈砂池水路形状・検討，水工学論文集 第39巻 1995年2月，p367～372
- 3) 藤井ら；曲がり有る流れの数値シミュレーション，第49回年次学術講演会講演概要集第2部(A)，1994.
- 4) 大谷ら；大断面曲がり水路の乱流特性，水工学論文集 第39巻 1995年2月，p793～798
- 5) 石野和男，大谷英夫，勝井秀博；急潮流下における橋梁周辺の捨石洗掘防止工の設計法に関する研究，土木学会論文集，No 521/II-32，1995-8，p123～133
- 6) Launder,B.E.and Spalding,D.B.;The numerical computation of turbulent flow,Comp.Meth.in.Appl. Mesh.,and Eng.,269,(1974)