

第5章 河川における洪水流の水理解析

目次

第1節	総説	1
第2節	洪水流解析の目的	1
第3節	目的に応じた洪水流解析手法の選定	3
3.1	目的に応じた選定	3
3.2	最高水位の算定における定常・非定常流解析の使い分け	4
第4節	計算手法の説明	6
4.1	一次元不等流計算	6
4.1.1	定義	6
4.1.2	計算方法	7
4.2	一次元不定流計算	9
4.2.1	定義	9
4.2.2	計算方法	9
4.2.3	一次元不定流計算の近似解法	10
4.3	準二次元不等流計算	10
4.3.1	定義	10
4.3.2	計算方法	11
4.4	準二次元不定流計算	12
4.4.1	定義	12
4.4.2	計算方法	12
4.5	平面二次元流解析	12
4.5.1	定義	12
4.5.2	計算方法	13
4.6	準三次元流解析	14
4.6.1	定義	14
4.6.2	計算方法	15
4.7	三次元流解析	16
4.7.1	定義	16
4.7.2	計算方法	16
第5節	パラメータの設定	18
5.1	パラメータの種類と設定の基本的な考え方	18
5.2	粗度係数の設定	18
5.3	逆算による同定の方法	19
5.3.1	逆算に用いるデータセットの種類	19
5.3.2	データセットに応じた同定	19
5.4	粗度状況による推定の方法	21
5.4.1	推定の基本的な考え方	21
5.4.2	出水中の河床変化が顕著でない場合の粗度係数の推定法	21
5.4.3	小規模河床波の発生を伴う場合の粗度係数の推定法	22
5.4.4	河川構造物の流体力の推定法	22

第5章 河川における洪水流の水理解析

第1節 総説

＜考え方＞

洪水流の水理解析は、所定の流下能力や侵食・洗掘に対する安全性を確保するための河道設計、流下能力を維持するための樹木群管理や河積の確保等の維持管理、遊水地の施設計画等、河川等の計画・設計・維持管理のために実施するものである。

洪水流の水理解析とは、ある形状及び粗度状況を持つ河道に、上流端において流量又は水位を、下流端において水位を設定し、その河道内で生じる水位・流量・流速などの水理量の空間的な分布及びその時間変化を算定するものである。ここで、粗度状況は、河床表層の凹凸の状態のことであり、高水敷の地被状況、低水路の河床材料の粒径、河床波の形状等がその一例である。なお、背の高い植物の倒伏や河床波の消長などに見られるように、流水の作用を受けて粗度状況が変化することもあり、検討対象とする流量時の粗度状況を的確に表現することが重要である。

解析手法の選定に当たっては、各種解析手法の原理と特徴、その適用限界などを理解した上で、目的を達成するための適切な解析手法を選択する。また、計算を実施するに当たって、必要となる各種パラメータ、初期条件及び境界条件を設定する。

なお、洪水流の水理解析は、実河川で生じる現象を対象としているため、一般的に以下のような制約の下で行われる。

- 1) 計算に用いる初期条件及び境界条件が必要な時空間解像度及び精度で得られていない場合がある。
- 2) 洪水流の発生頻度が高くないため、解析結果を検証する機会が限られる。
- 3) 洪水流の作用により粗度状況（河床波、植生の倒伏・破壊状況等）や河道形状が変化し、またその影響が洪水流に及ぶことについて、今後とも知見を拡充し、解析の信頼性をより高めていくことが必要である。

本章では、洪水流解析の目的及び目的に応じた洪水流解析手法の選定、各解析手法、及びパラメータの設定手法について標準的な方法を示す。

第2節 洪水流解析の目的

＜考え方＞

河川計画・設計・維持管理における洪水流の解析の主な目的は、以下のように整理される。

- 1) 所与の出水条件の下での最高水位等の洪水位の算定
- 2) 構造物等（河岸や樹木を含む）に作用する外力の算定
- 3) 水防関係水位の算定
- 4) 河道特性の把握・河川環境管理・河川利用空間管理のための水理量・水理環境の算定
- 5) 氾濫計算のための外水氾濫条件の算定
- 6) 水位・流量の伝播特性の把握
- 7) 河道変化予測のための水理量の算定

- 1) 所与の出水条件の下での最高水位等の洪水位の算定

堤防又は河岸（掘込河道の場合）近傍の最高水位は、流下能力に直接に関わるため重要である。

最高水位は、一般に流出解析や流量観測等によって得た最大流量を与えた定常流解析により算定する。ただし、対象河川の洪水伝播に関わる本来の特性や、下流端水位の時間変化特性、分合流あるいは遊水地等による対象河道区間での流量の出入りの状況等によっては、最高水位に与える非定常的特性の影響が無視できなくなる場合がある。このような場合には、非定常流解析を用いる。その具体的な判断法については本章 第 3 節 目的に応じた洪水流解析手法の選定 3.2 を参照のこと。

2) 構造物等（河岸や樹木を含む）に作用する外力の算定

流れによって生じる抗力・揚力・せん断力といった外力の算定に当たっては、構造物の表面に作用する応力分布を定常流解析によって算定し、その分布を構造物表面にわたって積分することにより求める方法や抗力係数又は揚力係数を用いた経験式を用いて構造物近傍の代表流速から求める方法等を用いる。この定常流解析から得られる外力は、流れ場の時間変動を均した平均値である。目的によっては外力の時間変動（又は変動の最大値）が必要であり、その場合には非定常流解析を用いる。

3) 水防関係水位の算定

水防関係水位とは、氾濫危険水位、避難判断水位、氾濫注意水位、水防団待機水位の総称とする。これらの水位は、築堤状況や堤内地盤高と計画高水位の関係等によって地先ごとに設定される値である。水防関係水位の算定とは、地先で設定された値と洪水予報観測所での水位を対応付けることであり、具体的方法は「危険水位の設定要領について」、「特別警戒水位の設定要領について」による。

水防関係水位の算定のためには等流計算、不等流計算、不定流計算等、各河川の状況に応じた適正な計算手法により行う。

4) 河道特性の把握、河川環境管理、河川空間管理のための水理量・水理環境の算定

河道特性の把握のための水理量として、河道地形の形成・変化特性を考察する上で重要な指標である摩擦速度、川幅水深比など水理量の縦断分布を算定する。それら算定結果を用いた分析の詳細については第 4 章 河道特性調査 第 5 節 洪水の作用 5.1 基本水理量の整理を参照のこと。

河川環境管理、河川空間管理のための水理環境として、たとえば動植物にとってのハビタット、景観等の形成、変化に関わる水理量を算定する。

たとえば植物群落の冠水頻度や河床の攪乱頻度については、生起確率が異なる複数の流量に対する水位や掃流力等が挙げられる。算定する水理量の選定に当たっては、第 11 章 河川環境調査 第 2 節 河川における環境調査の手法について、及び第 16 節 河川環境の総合的な分析を参照のこと。

5) 氾濫計算のための外水氾濫条件（氾濫の生じる流量）の算定

氾濫計算のための外水氾濫条件として、越流地点や堤防の決壊点における氾濫流量の算定に用いる河道内水位等を算定する。その際、第 7 章 浸水解析 浸水解析における堤内地の浸水解析と連動させて洪水流の解析を行うことで、氾濫に伴う河川流量の増減を考慮できる。ここで、浸水解析に必要とされる水理量は浸水解析の手法によって異なるため、洪水流の解析手法の選定に当たっては第 7 章 浸水解析 を参照のこと。

6) 水位・流量の伝播特性の把握

水位・流量の伝播特性の把握とは、河道の上流端で与えられた水位ハイドロや流量ハイドロ

が洪水流の流下に伴って変形する過程を再現するものである。洪水流は、河道内に存在する狭窄部、樹木群などの影響を受けて、流量に比べて水位の伝播が遅れる場合がある。このような水位と流量の伝播特性の違いを表現するためには、非定常流解析を用いる。

7) 河道変化予測のための水理量の算定

流砂量の算定に必要な掃流力など水理量を算定するものである。河床変動計算の詳細については、第6章 河床変動、河床材料変化及び土砂流送の解析を参照のこと。

<関連通知等>

- 1) 河川局治水課都市河川室長：危険水位の設定要領について（通知），国河都第3号，2005年5月。
- 2) 河川局治水課都市河川室長：特別警戒水位の設定要領について（通知），国河都第4号，2005年5月。
- 3) 河川局治水課都市河川室長：洪水予報河川における避難判断水位の設定要領について，国河都第4号，2006年12月。
- 4) 国土交通省河川局治水課：浸水想定区域図作成マニュアル，2005年6月。

第3節 目的に応じた洪水流解析手法の選定

3.1 目的に応じた選定

<考え方>

洪水流解析として、表5-3-1に示す計算手法を用いる。

一次元解析[1DF]とは、河道横断面内で平均した水理量（水深、流速、河床せん断力など）の縦断分布を算定するものである。

準二次元解析[2DF']とは、河道横断面を粗度状況や水深等が同一と見なせる区間ごとに分割して等流近似の下で横断方向流速分布を算定し、この分布を反映した運動量補正係数とせん断力の算定式を一次元解析に組み込んで断面平均流速や水位等の縦断分布を算定するものである。

二次元解析[2DF]とは、水深方向に平均した水理量を対象として、水理量の平面分布を算定するものである。

準三次元解析[3DF']とは、二次元解析を拡張して水深方向に平均した水理量のほか、静水圧分布の仮定の下で二次流を含めた水深方向の流速分布を算定するものである。

三次元解析[3DF]とは、非静水圧分布となる流れ場にも適用でき、流水中の任意の位置における水理量を対象として、その平面及び水深方向の分布を算定するものである。

各解析には、流れ場の空間的分布を算定する定常計算とさらにその時間変化も計算対象とする非定常計算がある。

洪水流解析の目的 1)～6) に応じて、表5-3-2に従って計算手法を選定する。なお、目的7)の計算手法の選定については、第6章 河床変動、河床材料変化及び土砂流送の解析で述べる。

表5-3-2において<推奨>とした計算手法は、<標準>として示す手法では解析対象とした事象を十分に再現することができず、<推奨>として示す高度な手法を採用する必要がある場合に選定する。また<例示>とした計算手法は、<標準>として示す手法より流れ場の記述レベルが低い手法でも目的を十分に満たす再現性が得られ、<例示>として示す比較的簡便な手法を採用することができる場合に選定する。

計算手法の選定に当たっては、計算に必要とされる情報の取得可能性についても併せて検討することが重要である。なお、目的1)～7)以外の目的で洪水流解析を活用する場合でも、表

5-3-2の「目的に対して必要となる物理量」を参考にして適切な解析手法を目的に合わせて選定する。

表5-3-1 洪水流解析に用いる計算手法の一覧（記号は表5-3-2の凡例参照）

解析レベル	記号	H	Δh	U	u_{ave}	v_{ave}	u	v	w	Δp
一次元解析	1DF	○		○						
準二次元解析	2DF'	○		○	Δ^*					
二次元解析	2DF	○	○	○	○	○				
準三次元解析	3DF'	○	○	○	○	○	Δ	Δ	Δ	
三次元解析	3DF	○	○	○	○	○	○	○	○	○

凡例 ○:計算できる項目

△:近似的に計算できる項目

△*:近似的に計算できる項目(断面区分単位の流速分布)

表5-3-2 目的に対して必要となる物理量と洪水流解析手法の選定

目的	非常性考慮の有無		目的に対して必要となる物理量 (計算で扱う物理量はこれよりも多いことが一般的)										計算方法		
	定常	非定常	H	Δh	U	u_{ave}	v_{ave}	u	v	w	Δp	時間変動	標準	推奨	例示
所与の出水条件の下での最高水位等の洪水位の算定	●	○	●	● ^{※1}	-	-	-	-	-	-	-	-	2DF不等流	2DF 3DF'	1DF不等流 ^{※4}
	○	●	●	● ^{※1}	-	-	-	-	-	-	-	-	1DF不定流 2DF不定流	2DF 3DF'	-
構造物等(河岸や樹木を含む)に作用する外力の算定 ^{※2}	●	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	2DF不等流 2DF	2DF不定流 2DF 3DF 3DF	1DF不等流
水防関係水位の算定	●	○	●	● ^{※1}	-	-	-	-	-	-	-	-	2DF不等流	1DF不定流 2DF不定流	1DF不等流
河道特性の把握のための水理環境・水理量の算定	●	-	●	-	●	-	-	-	-	-	-	-	2DF不等流	2DF	1DF不等流 ^{※4}
河川環境管理・河川利用空間管理のための水理環境・水理量の算定	●	-	●	-	●	-	-	-	-	-	-	-	2DF不等流	2DF	1DF不等流 ^{※4}
氾濫計算のための外水氾濫条件の算定 ^{※3}	-	●	●	● ^{※1}	○	○	○	-	-	-	-	-	1DF不定流 2DF不定流	2DF	-
水位・流量の伝播特性の把握	-	●	●	-	●	-	-	-	-	-	-	-	2DF不定流	2DF	1DF不定流

凡例

H :横断方向平均水深

Δh :Hからの横断方向偏差

U :断面平均流速

u_{ave} :水深平均流速

v_{ave} :水深平均流速(横断方向)

● :目的に対して必須の水理量

○ :条件によっては必要となる水理量

※1 堤防もしくは河岸近傍(掘込河道の場合)における水位

※2 構造物周辺における河床変動については第6章 河床変動、河床材料変化および土砂流送の解析を参照

※3 第7章 浸水解析の第3節において標準とした外水浸水解析モデルとの組み合わせを前提としている

※4 目的を十分に満たす場合には、計算に用いる情報の取得状況に鑑みて等流計算を採用することができる

u :流下方向流速

v :横断方向流速

w :水深方向流速

Δp :静水圧分布からの偏差

時間変動 :流速・水深・圧力の時間的変動成分

3.2 最高水位の算定における定常・非定常流解析の使い分け

<考え方>

下記 a)~d)のいずれにも当たらない場合には、流出解析や流量観測等により得た最大流量をあらかじめ与えた定常流解析を用いることが基本となる。下記 a)~d)のいずれかに該当する場合は、非定常流的特性を解析において考慮する必要性が高まるので、非定常流解析を用いることが基本となる。

- 分合流や遊水地等による流量の出入りの影響がないとできる河道区間において、最大流量と最高水位時の流量に有意な差(ズレ)が生じる。
- 分合流や遊水地等による流量の出入りの影響がないとできる河道区間において、各地点の最大流量が河川沿いに有意に変化し、それをあらかじめ与えることが難しい。
- 対象とする河道に、分合流や遊水地等による流量の出入りが存在する区間が含まれ、その出

入りの量をあらかじめ与えることができず、非定常流解析によって一体的に計算する必要がある。

d) 対象とする河道に、分合流や遊水地等による流量の出入りが存在する区間が含まれ、その出入りの流量をあらかじめ与えることができる場合において、その流量の出入りが、最大流量と最高水位発生のタイミングに有意な差（ズレ）を生じさせる。

a) については、河口付近での潮位変化、支川を対象とする場合の本川との合流点付近での水位変化、水門操作による水位制御の影響を受ける場合など、解析の境界条件である下流端水位の時間変化に起因する場合と、対象河川の洪水伝播に関わる本来的特性による場合がある。このうち後者に該当するかどうかを判別する考え方について及び b)（これも洪水伝播にかかわる本来的特性に起因する）に該当するかどうかを判別する考え方について以下に述べる。

一様の川幅、勾配の単断面河道を対象とした一波の洪水波の流下に伴う水位・流量変化に関する水理特性（非定常性）の要点は、下記のとおりである。

- ・ 流下距離の増加に伴って最大水深は低減するが、水深の増大が生じている期間は長くなる（洪水波形の偏平化）
- ・ 最大水深の低減は、流下距離が大きくなるほど、水深の時間変化を表す曲線のピーク部形状が尖鋭であるほど、また、河床勾配及び断面平均流速（又は洪水波の伝播速度）が小さいほど顕著となる。

実河川では、上記特性に河道横断形状（複断面）や粗度・河積の縦断的な変化（たとえば樹木群や狭窄部等）等の影響が加わる。非定常性が顕在化すると、任意の河道断面においては、流量と水深の関係が図 5-3-1a) に一例を示すように明瞭なループを描くようになり、流量と水深のピークが現れる時間差が大きくなる。また、流下方向には、図 5-3-2 に示すように、洪水流の流下に伴って水深・流量の低減が顕著となる。こうした特性を踏まえて、洪水伝播にかかわる本来的特性のために非定常流解析を使う必要があるかどうかの判断の材料は、以下の 2 点に集約される。

①最大流量と最高水位時の流量との差（ズレ）の大きさ（図 5-3-1a), b) 参照）

②河道内流量の出入りのない一連区間の上下流端での最大流量の差（ズレ）の大きさ（図 5-3-2 参照）

流量の差（ズレ）は第 2 章 水文・水理観測に基づく水位・流量観測結果（カテゴリー 1 の観測等）を用いて評価することができる。①②のいずれかに有意な差（ズレ）がある場合には、最大流量を与えた定常流解析による最高水位の算定に一定の誤差が含まれる。その場合、同一の粗度係数を用いた非定常流解析に比べて最高水位が大きめに算定される傾向を示す。こうした傾向を加味した上で、解析の目的を満たす精度で最高水位を得るため、非定常流解析の適用の必要性について検討する。なお、②の差（ズレ）については、図 5-3-2 に示すように一連区間を更に細分し、各区間ごとに最大流量を適切に与えることで小さくすることができる。こうした区間割と最大流量の再設定が可能な場合には、①の観点から非定常流解析の適用の必要性について検討することによい。

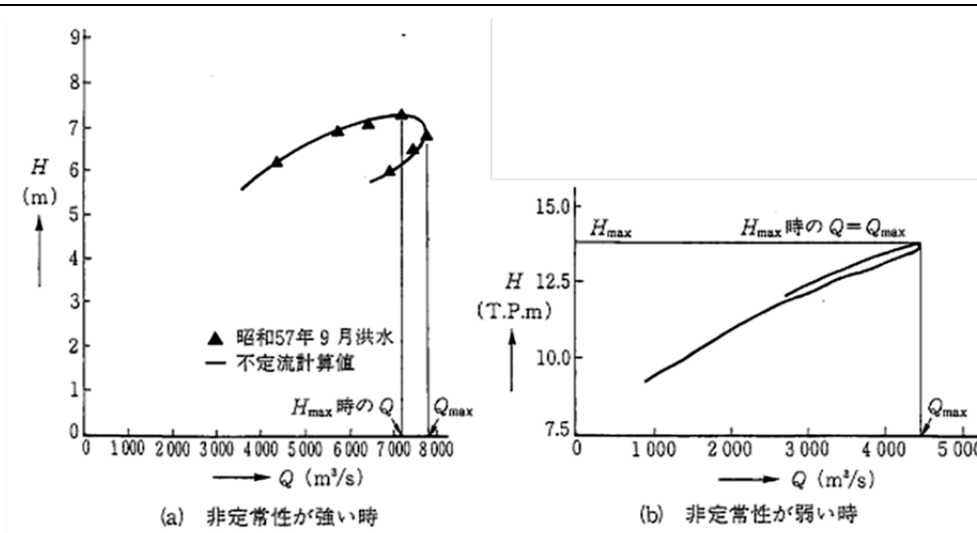


図5-3-1 水位流量曲線図の例

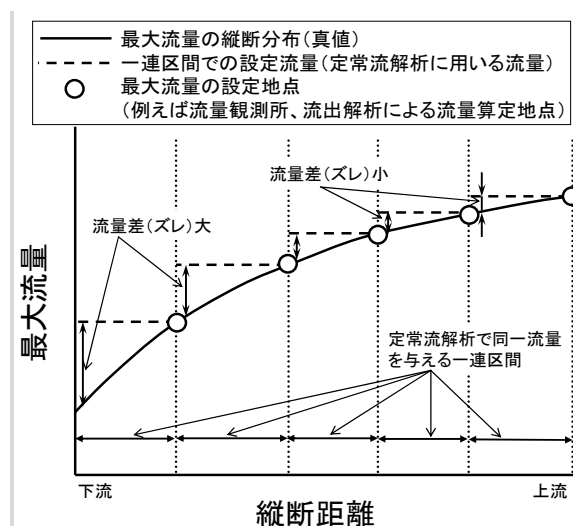


図5-3-2 流下方向への最大流量の低減と区間別の最大流量設定例

第4節 計算手法の説明

4. 1 一次元不等流計算

4. 1. 1 定義

<考え方>

一次元不等流計算[1DF 不等流]は、流量 Q を一定とし、基礎式として運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-1)を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\int u^2 dA \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{T_r}{\rho} = 0 \quad (5-4-1)$$

ここで、 A は流れの断面積、 x は流下方向に沿った座標、 H は水位、 T_r は単位長さの河道の河床に作用する力、 u はある点での流速、 ρ は水の密度、 g は重力加速度である。ここで、左辺第1項の括弧内は運動量補正係数 β を用いて式(5-4-2)のように置き換えられる。

$$\int u^2 dA = \beta U^2 A \quad (5-4-2)$$

ここで、 U は断面平均流速である。

一次元不等流計算は、断面内の粗度状況が一様及び変化する単断面河道に適用するのを標準とする。この場合、 β は一定値（1.0～1.1程度）とする近似的な取扱いを行う。

T_r の算定に当たっては、式(5-4-3)に示すManningの平均流速公式を適用するのを標準とする。

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} I_b^{1/2} \quad (5-4-3)$$

ここで、 I_b は河床勾配、 $R (=A/S)$ は径深である。平均流速公式とは、縦断方向に一様な河道断面における等流を想定し、河道断面形と河床勾配が与えられたときに、平均流速を粗度係数及び径深と関係づける式である。

断面内の粗度状況が一様又は図 5-4-1 に示すように変化する場合、 T_r は式(5-4-4)、(5-4-5)により算定する。

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{gAn^2U^2}{R^{4/3}} \quad (5-4-4)$$

$$\frac{T_r}{\rho} = \frac{gU^2}{A^{1/3}} \cdot \left(\sum S_i \cdot n_i^{3/2} \right)^{4/3} \quad (5-4-5)$$

ここで、 S_i は同一の粗度を有する i 番目の潤辺部の長さ、 n_i はその潤辺部での粗度係数である。

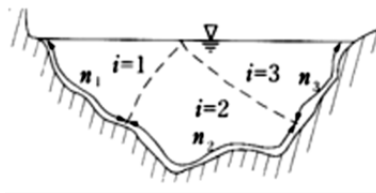


図5-4-1 複数の粗度係数を有する河道横断面

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成11年版]，土木学会，丸善，pp.111-114，1999.

4. 1. 2 計算方法

<標準>

式(5-4-1)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に与え、標準逐次計算法により数値計算を行うのを標準とする。

計算断面については、距離標ごとに設定するのを標準とする。

支配断面が現れる断面の近傍あるいは大きなエネルギー勾配が現れる断面の近傍では、必要に応じて内挿断面を挿入するのを標準とする。

河道形状、河川構造物や樹木群繁茂領域等については、河川定期横断測量、河道平面図、航

空写真、植生図、樹木群調査の結果（第4章 河道特性調査 第3節 各時点の河道状況 参照）を用いて設定するのを標準とする。

樹木群、河道の急拡・急縮等により死水域が形成される場合には、該当する計算断面において死水域に相当する部分を河積から除く。以上の設定手法については、河道計画の検討の手引き、及び河川における樹木管理の手引きによる。

粗度係数については、本章 第5節 に基づいて適切に設定する。

分合流点、跳水発生地点、段落ち部及び橋脚設置地点を含む河道区間においては、式(5-4-1)に代えて、これら地点を間に挟む上下流の計算断面間をコントロールボリュームとしてこれら事象に即した運動量式（又はエネルギー方程式）に基づいて水位を算定する。

また、河道湾曲区間や砂州の発達する区間における左右岸水際部の水位は、河道形状や水理量等に基づいて横断方向偏差 ΔH の算定式を別途用意し、これにより算定した ΔH を式(5-4-1)により算定した平均水位に付加することにより得る。

以上の算定手法については、水理公式集[平成11年版]および河道計画検討の手引きによる。

河口部において下流端境界条件を与える場合には、潮位、河川水と塩水との密度差、河口砂州などを考慮し、下流端水位を設定する。

<推 奨>

解析の精度・解像度の向上の観点から、航空レーザ測量やサイドスキャンソナーを用いた音響測深等による高解像度の連続的な河道地形測量成果を用いて河道形状を設定するのを推奨する。

常流と射流が混在した流れ場を対象とする場合には、本節 4.2.2<推奨>に記載する一次元不定流計算を流量及び水位一定の境界条件の下で実施し、水位や流速等の水理量が時間的に安定した定常状態の解を得るのが望ましい。

<例 示>

標準逐次計算法により常流と射流が混在した流れ場の計算を行う場合には、支配断面の位置を予測して常流と射流の発生区間を判別する方法が適用できる。

また、河川水と海水の密度差を考慮した下流端水位の簡易的な設定法として、潮位から求めた河口部水深 h_0 と $(\rho_2/\rho_1 - 1)$ （ここで ρ_2 、 ρ_1 は海水と河川水の密度）の積として求めた値を河口部の潮位に加える方法を用いることができる。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成11年版]，土木学会，丸善，pp.93-98，1999.
- 2) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp.84-97，pp.109-114，pp.119-124，pp.142-144，2001.
- 3) (財)リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp.93-96，1999.

<参考となる資料>

支配断面の位置を予測する手法については下記の資料が参考となる。

- 1) 石川忠晴, 林正男: 常流・射流が混在する区間の不等流計算法, 土木技術資料, Vol. 25, No. 3, pp. 39-44, 1983.

4. 2 一次元不定流計算

4. 2. 1 定義

<考え方>

一次元不定流計算[1DF 不定流]は、基礎方程式として連続方程式及び運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-6)、式(5-4-7)を用いる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5-4-6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int u^2 dA \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{T_r}{\rho} = 0 \quad (5-4-7)$$

ここで、 t は時間である。一次元不定流計算は、断面内の粗度状況が一様及び変化する単断面河道に適用することを標準とする。式(5-4-7)の左辺第2項及び第4項は、本節 4.1.1 に示した一次元不等流計算と同様に式(5-4-2)、(5-4-4)、(5-4-5)により算定する。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会: 水理公式集[平成11年版], 土木学会, 丸善, p. 120, 1999.

4. 2. 2 計算方法

<標準>

式(5-4-6)、式(5-4-7)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に与え、数値計算を行うのを標準とする。

計算時間間隔については、計算が安定的に進められ、かつ所定の精度及び解像度が得られるように設定するのを標準とする。

計算断面、河道形状、粗度係数、樹木群や死水域、河口部における下流端境界条件等については、本節 4.1.2 と同様に設定する。

河道湾曲部、砂州の発達する区間における左右岸水際部の水位は、本節 4.1.2 と同様に算定する。

<推奨>

常流と射流が混在する流れ場を対象とする場合には、跳水や段波などの不連続的な流れや常流から射流への遷移流れといった急変流に適応した計算手法を用いることが望ましい。

<参考となる資料>

常流と射流が混在した流れ場に適応した計算手法の一例として流束差分法(FDS法)が挙げられ、下記の資料が参考となる。

- 1) 西本直史, 森明巨, 板倉忠興, 金澤克己: FDS法による1次元開水路流れの数値解析, 土木学会論文集, No. 670, II-54, pp. 25-36, 2001.
- 2) 秋山壽一郎, 浦勝, 重枝未玲, アキレス K. ジャ: 1次元浅水流方程式のFDSに基づく数値解析法, 水工学論文集, 第44巻, pp. 473-478, 2000.

4. 2. 3 一次元不定流計算の近似解法

<考え方>

一次元不定流計算の近似解法とは、運動方程式の運動量の時間変化に関する項、運動量や水深の縦断方向変化に関する項の全て又は一部を省略した近似式を用いて解析を行うものである。このような近似解法として、Kinematic wave モデル、Diffusion wave モデル等があり、本節 4. 2. 1 に示した計算法と併せて水理学的追跡法と呼ばれる（第 3 章 水文解析 2. 2. 4 参照）。計算法については、本節 4. 2. 2 に準ずる。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp.120-125，1999。

4. 3 準二次元不等流計算

4. 3. 1 定義

<考え方>

準二次元不等流計算[2DF'不等流]は、流量 Q を一定とし、基礎式として式(5-4-1)と β 及び T_r の算定式である式(5-4-8)～(5-4-13)を用いる。

$$\beta = \frac{\int u^2 dA}{U^2 A} = \frac{\beta_1 \sum_i (U_i^2 A_i)}{U^2 A} \quad (5-4-8)$$

$$\frac{T_r}{\rho} = \sum_i \left\{ \frac{g n_i^2 U_i^2 S_{bi}}{R_i^{1/3}} + \sum_{ji} (f U_i^2 S_{wji}) \right\} \quad (5-4-9)$$

$$\frac{n_i^2 U_i^2}{R_i^{1/3}} S_{bi} + \frac{\sum_{ji} (\tau'_{ji} S'_{wji})}{\rho g} + \frac{\sum_{ji} (\tau_{ji} S_{wji})}{\rho g} = A_i \cdot I_b \quad (5-4-10)$$

$$\tau_{ji} = \rho f U_i^2 \quad (5-4-11)$$

$$\tau'_{ji} = \rho f (\Delta U_{ji}) |\Delta U_{ji}| \quad (5-4-12)$$

$$Q = \sum_i (A_i U_i) \quad (5-4-13)$$

ここで、 S_b は壁面せん断力が働く潤辺長、 S_w は樹木群境界の潤辺長、 S'_w は分割断面境界の潤辺長、 τ と τ' は樹木群境界及び分割断面境界に作用するせん断力、 ΔU_{ji} は境界面を介して隣り合う分割断面間での断面平均流速差、 f は境界混合係数、 β_1 は各分割断面内の運動量補正係数(1.1又は1が標準)である。なお、添え字 i は i 番目の分割断面についての量であることを、添え字 j は j 番目の分割断面境界あるいは樹木群境界についての量であることを表す(ただし、 i 番目の分割断面に関わる境界のみが対象)。

準二次元不等流計算は、断面内の粗度状況が一様又は変化する複断面河道に適用することを標準とする。

式(5-4-8)～(5-4-13)は、 f を導入して隣り合う断面間での干渉効果を考慮したものである。ここで、干渉効果とは河道横断方向に急な流速変化が生じ、そこで生じる横断方向の組織的流

体混合・運動量輸送により流れ全体の抵抗が増大する効果のことである。

断面分割と境界混合係数の設定に当たっては、一般に急な流速変化をもたらす地形・粗度状況の条件に基づいて行う。河道断面形状及び粗度状況（一般的には樹木群境界）の急変点において分割断面境界を設定する。また、境界混合係数についても、断面急変部と樹木群境界に分けて設定手法を使い分ける。

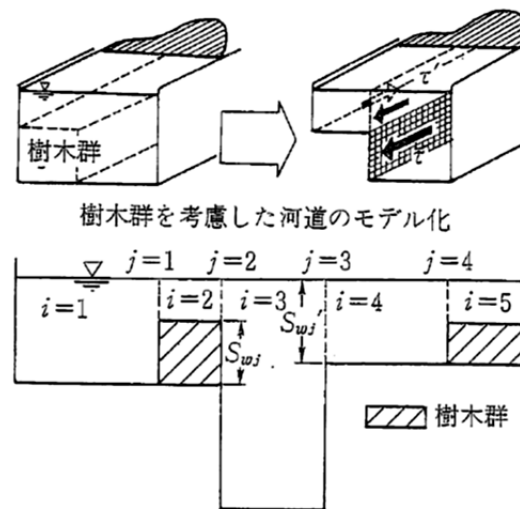


図5-4-2 準二次元不等流計算での断面分割の一例

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp. 111-116，1999.
- 2) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp. 79-81，2001.

4. 3. 2 計算方法

<標準>

本節 4. 1. 2 と同様に式(5-4-1)を差分化し、数値計算を行うのを標準とする。

境界混合係数については、水理公式集[平成 11 年版]、河道計画の検討の手引き及び河川における樹木管理の手引きを参考にして適切に設定する。

計算断面、河道形状、粗度係数、樹木群や死水域、河口部における下流端境界条件等については、本節 4. 1. 2 と同様に設定する。

分合流点、跳水発生地点、段落ち部、橋脚設置地点、河道湾曲部、砂州の発達する区間における水位変化については、本節 4. 1. 2 と同様に算定する。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp. 98-106，1999.
- 2) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp. 81-84，2001.
- 3) (財)リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp. 104-108，1999.

4. 4 準二次元不定流計算

4. 4. 1 定義

<考え方>

準二次元不定流計算[2DF'不定流]は、基礎式として式(5-4-6)、(5-4-7)を用い、 β 及び T_r は本節 4.3.1 に示した準二次元不等流計算と同様に式(5-4-8)～(5-4-13)により算定する。

準二次元不定流計算は、断面内の粗度状況が一樣又は変化する複断面河道に適用するのを標準とする。

4. 4. 2 計算方法

<標準>

本節 4.2.2 と同様に式(5-4-6)、式(5-4-7)について数値計算を行うことを標準とする。

計算断面、断面分割、河道形状、粗度係数、樹木群や死水域の配置、境界混合係数、河口部における下流端境界条件等については、本節 4.3.2 と同様に設定する。

また、河道湾曲部、砂州の発達する区間における水位変化については、本節 4.1.2 と同様に算定する。

<参考となる資料>

準二次元不定流計算の計算方法の詳細については、下記の資料が参考となる。

- 1) 福岡捷二，佐藤宏明，出口桂輔：洪水流の非定常準二次元解析法の研究，土木学会論文集，土木学会，Vol. 65，No. 2，pp. 95-105，2009.

4. 5 平面二次元流解析

4. 5. 1 定義

<考え方>

平面二次元流解析[2DF]は、基礎式として連続方程式及び運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-14)～(5-4-17)を用いる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [h\bar{u}] + \frac{\partial}{\partial y} [h\bar{v}] = 0 \quad (5-4-14)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = F_x - g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[-\overline{hu'^2} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{hu'v'} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \quad (5-4-15)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = F_y - g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left[-\overline{hu'v'} \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{hv'^2} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad (5-4-16)$$

$$\begin{pmatrix} -\overline{u'^2} & -\overline{u'v'} \\ -\overline{u'v'} & -\overline{v'^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\nu_{txx} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3}K & \nu_{txy} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ \nu_{tyx} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) & 2\nu_{tyy} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3}K \end{pmatrix} \quad (5-4-17)$$

ここで、 x, y は水平面又は河床面に平行な直交座標軸、 u, v はある点での各座標軸方向の流速（乱れ成分を平均化したもの）、 F_x, F_y は外力（質量力）、 H は水位、 \bar{u}, \bar{v} は水深平均の u, v 、 h は水深、 τ_b は河床せん断力、 ν_t は渦動粘性係数、 K は乱れエネルギーである。添え字 x, y は

それぞれ作用方向の座標軸を表す。

平面二次元流解析は、静水圧分布の近似が成り立つ流れ場に適用するのを標準とする。ただし、曲率半径の小さい湾曲流れ、構造物近傍の局所的な流れ等といった二次流による運動量輸送が卓越する場合や非静水圧分布となる場合には、本節 4.6、4.7 に示す準三次元流解析、三次元流解析を適用する。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp.118-119，1999.

4.5.2 計算方法

<標準>

式(5-4-14)～式(5-4-17)を差分化し、河道形状、粗度状況、境界条件を適切に設定し、数値計算を行うのを標準とする。

計算格子の設定に当たっては一般座標系を用い、河岸法線形状、堤防法線形状、定期横断測線の位置を考慮して座標を設定するのを標準とする。

河道形状、河川構造物や樹木群繁茂領域等については本節 4.1.2 に示した資料に基づいて設定する。

計算時間間隔については、計算が安定的に進められることはもちろんのこと、所定の精度及び空間解像度が得られるように設定する。

河床せん断力については、Manning の式若しくは対数則などを用いて算定するのを標準とする。粗度係数については、本章 第 5 節に基づいて適切に設定する。

式(5.4.17)には、式(5.4.18)に示す渦動粘性モデルを適用するのを標準とする。

$$\begin{aligned}v_t &= au_*h \\ K &= 0\end{aligned}\tag{5-4-18}$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 a は定数である。

式(5-4-18)は、水深スケールの乱れが卓越する流れ場での平面的な流体混合のモデルであり、水深や粗度が空間的に漸変する河道の場合、 a は 0.13～0.15 程度の値をとる。

<推奨>

高水敷・低水路間等での河道横断形状の急変部や樹木群等の植物群落を含む流れ場であり、かつ平面せん断流に伴う大規模平面渦など組織的流体混合による河道平面方向の運動量輸送が卓越して発生する場合には、以下の二通りのアプローチで解析を行うことが望ましい。

①平面せん断流の平均的な効果を渦動粘性係数により評価するアプローチ

②平面スケールの組織的流体混合現象を平面二次元流解析の直接の対象とするアプローチ

(本アプローチでは、渦の動きを表す流速の時空間的な変化を計算結果として得る。実務上は、こうした流速の変動を直接必要とすることは少なく、渦による混合の効果を受けた平均的な流速(例えば断面平均流速、横断方向流速分布等)に関する情報を用いるのが一般的である。平均的な流速は、本アプローチで得た流速の変動を時空間的に平均することで得られる。)

①のアプローチでは、平面せん断流に関する水理量、河道形状、植物群落の粗度・形状等に基づいて、組織的流体混合現象に即した渦動粘性係数を設定する。②では、解析によって平面

渦に伴う流れが直接計算されるので、渦動粘性係数については、大規模平面渦よりスケールが小さく、直接の解析対象外となる流体混合に即した値を設定する。そのような設定の一例として、水深スケール以下の流体混合を式(5-4-18)と同様に摩擦速度と水深の関数として与えることが挙げられる。

また、解析の精度及び空間解像度の向上の観点から、航空レーザ測量やサイドスキャンソナーを用いた音響測深等による高解像度の連続的な河道地形測量成果を用いて河道形状を設定することを推奨する。

<例 示>

渦動粘性係数 ν_t と乱れエネルギー K の算定方法として、 $k-\epsilon$ モデル等の乱流モデルの方程式に基づいて計算する方法を用いることができる。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会:水理公式集[平成11年版], 土木学会, 丸善, pp. 98-99, pp. 106-107, 1999.

<参考となる資料>

一般座標系については下記の資料 1), 2)、同様に乱流モデルについては資料 3) が参考となる。

- 1) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, Md Munsur Rahman: 移動一般座標系による側岸侵食を伴う河床変動の数値解析, 水工学論文集, 第40巻, pp. 927-932, 1996.
- 2) 細田尚, 長田信寿, 村本嘉雄: 移動一般座標による開水路非定常流の数値解析, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 267-272, 1996.
- 3) 灘岡和夫, 八木宏: SDS&2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No. 273/II-24, pp. 35-44, 1993.

4. 6 準三次元流解析

4. 6. 1 定義

<考え方>

準三次元流解析[3DF]は、基礎式として連続方程式及び運動方程式に基づく漸変開水路流れを対象とした式(5-4-19)～(5-4-23)を用いる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^H u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^H v dz = 0 \quad (5-4-19)$$

$$w = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^z u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^z v dz \quad (5-4-20)$$

$$\frac{Du}{Dt} = F_x - g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \quad (5-4-21)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = F_y - g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'^2} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{v'w'} \quad (5-4-22)$$

$$\begin{pmatrix} -\overline{u'^2} & -\overline{u'v'} & -\overline{u'w'} \\ -\overline{u'v'} & -\overline{v'^2} & -\overline{v'w'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2v_{txx} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}K & v_{txy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & v_{txz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ v_{tyx} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 2v_{tyy} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}K & v_{tyz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{pmatrix} \quad (5-4-23)$$

ここで、 z は xy 平面に対して垂直上向きの直交座標軸、 w はある点での z 座標軸方向の流速（乱れ成分を平均化したもの）、 z_b は河床面の z 座標である。

準三次元流解析は、 $w \ll \overline{u}, \overline{v}$ であり静水圧分布の近似が成立する場合に適用するのを標準とする。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp.118-119，1999.

<参考となる資料>

準三次元流解析については、下記の資料が参考となる。

- 1) 石川忠晴，鈴木研二，田中昌宏：開水路流の準三次元計算法に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 375 号/II-6，pp.181-189，1986.

4. 6. 2 計算方法

<例 示>

式(5-4-19)～(5-4-23)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に設定し、数値計算を行う。

計算格子、河道形状、粗度係数、河川構造物や樹木群繁茂領域等や河床せん断力については、本節 4.5.2 と同様に設定できる。

<参考となる資料>

準三次元不定流計算を実施するに当たって、鉛直方向の流速分布式を与えて 2 次流による運動量輸送を算定する方法は資料 1)～4)、渦度方程式を用いた方法については資料 5) が参考となる。また、大規模平面渦の算定については資料 6) が参考となる。

- 1) 福岡捷二，五十嵐崇博，西村達也，宮崎節夫：河川合流部の洪水流と河床変動の非定常三次元解析，水工学論文集，第 39 巻，pp.435-440，1995.
- 2) 細田尚，長田信寿，岩田通明，木村一郎：一般座標系での主流と 2 次流の遅れを考慮した平面 2 次元流モデル，水工学論文集，第 44 巻，pp.587-592，2000.
- 3) 音田慎一郎，細田尚，木村一郎：一般座標系での湾曲流の水深積分モデルの改良とその検証について，水工学論文集，第 50 巻，pp.769-774，2006.
- 4) 吉田圭介，石川忠晴：円筒座標 CIP-Soroban 法と境界適合座標法を組み合わせた蛇行河川の準 3 次元計算法，水工学論文集，第 52 巻，pp.997-1002，2008.
- 5) 内田龍彦，福岡捷二：浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用，水工学論文集，第 53 巻，pp.1081-1086，2009.

- 6) 吉田圭介, 石川忠晴, 箕浦靖久: 準3次元 CIP-Soroban モデルによる利根川洪水流の大規模数値計算, 水工学論文集, 第53巻, pp. 877-882, 2009.

4.7 三次元流解析

4.7.1 定義

<考え方>

三次元流解析[3DF]は、基礎式として式(5-4-24)～(5-4-28)を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5-4-24)$$

$$\frac{Du}{Dt} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'^2} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \quad (5-4-25)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'^2} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{v'w'} \quad (5-4-26)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'w'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'w'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'^2} \quad (5-4-27)$$

$$\begin{pmatrix} \overline{-u'^2} & \overline{-u'v'} & \overline{-u'w'} \\ \overline{-u'v'} & \overline{-v'^2} & \overline{-v'w'} \\ \overline{-u'w'} & \overline{-v'w'} & \overline{-w'^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2v_{txx} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} K & v_{txy} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & v_{txz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ v_{tyx} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & 2v_{tyy} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} K & v_{tyz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ v_{tzx} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & v_{tzy} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & 2v_{tzz} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} K \end{pmatrix} \quad (5-4-28)$$

ここで、 F_z は外力(質量力)である。添え字 z は作用方向の座標軸を表す。

三次元流解析は計算負荷が大きく、そのため広範囲にわたる実河川での適用事例が少ない。三次元流解析の適用に当たっては、水制等の構造物周辺の流況を再現する場合など局所的かつ非静水圧分布となる流れ場であるか、かつ解析の目的に照らし合わせて三次元流解析の必要性が高いか、前もって十分に吟味することが重要である。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会: 水理公式集[平成11年版], 土木学会, 丸善, pp. 118-119, 1999.

4.7.2 計算方法

<例示>

式(5-4-24)～式(5-4-28)を差分化し、河道形状、粗度係数、境界条件を適切に設定し、数値計算を行うことを標準とする。

河道形状、粗度係数、河川構造物や樹木群繁茂領域等や河床せん断力については、本節 4.5.2 と同様に設定できる。

<参考となる資料>

乱流モデルについては、下記の資料が参考となる。

- 1) 河原能久，彭 静，藤井和之：越流型水制工を有する河道内の流れの3次元数値解析，河川技術論文集，第3巻，pp. 17-22，1997.
- 2) 長田信寿，細田尚，村本嘉雄，中藤達昭：3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析，土木学会論文集，No. 684/II-56，pp. 21-34，2001.

第5節 パラメータの設定

5.1 パラメータの種類と設定の基本的な考え方

<考え方>

水理解析におけるパラメータとしては、各解析法に内在したパラメータと河道の粗度状況に依存したパラメータが存在する。

前者は、準二次元流解析の境界混合係数、平面二次元流解析の渦動粘性係数等である。一方、後者の粗度状況に依存したパラメータとは基本的に粗度係数を指す。

計算手法に内在したパラメータは、既往の知見から水理条件等に応じて設定されることが多く、その設定方法を本章 第4節 計算手法の説明 に記載している。したがって、本節では粗度係数の設定法について述べる。

なお、計算手法に内在したパラメータについては、実洪水の観測結果から逆算等によって検証されることが少なからず行われてきたが、観測技術の進歩に伴ってデータの空間分解能や時間分解能が向上してきたことも考慮して、今後とも積極的に検証を試みる事が重要である。

5.2 粗度係数の設定

<考え方>

粗度係数の設定方法としては、逆算によって粗度係数を同定する方法、河道の粗度状況から物理的に粗度係数を推定する方法の大きく分けて二つが存在する。

粗度係数の逆算による同定法とは、適切な平均流速公式を用いた洪水流の計算手法に実測の河道形状、水位、流量あるいは流速を与えて、粗度係数を算定することである。逆算粗度係数には、その洪水発生時の種々の情報が集約されており、実績と言う意味で重みがある。設定対象とする粗度状況、河道形状、洪水規模が、粗度係数逆算対象のそれらと余り変わらない場合には、妥当な設定を行うことができる。逆にそうでない場合、この設定が妥当ではなくなる可能性がある。質が良く十分な数の粗度係数逆算が行われていることが前提となり、また、設定結果の成否が洪水データの精度に依存する。

物理的な推定による方法とは、推定法の原理、特徴、適用範囲を理解した上で、対象となる場の特性を踏まえた適切な推定法に基づき粗度係数を算定するものである。粗度状況による粗度係数の推定は、一般性、応用性が高く、原理的には任意の断面形状、洪水規模及び粗度状況に適用できる。したがって、任意の粗度状況、河道形状、洪水規模を想定した粗度係数設定を行うことができる。その一方で、粗度係数の物理性が保たれるような平均流速公式の使用が前提となる。また、粗度係数の推定精度や推定法の適用範囲に限界や不確定要素が残る。

粗度係数の設定に当たっては、逆算による同定法と粗度状況による推定法の弱点を補完するように、両方の設定法を併用することが現実的な選択である。すなわち、河道の粗度状況から物理的に粗度係数を設定し、その一方で、その設定により既往代表洪水の逆算粗度係数あるいは洪水位を再現できるかを確認し、必要に応じて、逆算粗度係数値を踏まえて粗度係数を修正するというものである。あるいは、逆算粗度係数に基づき粗度係数を設定することを試み、その一方で、逆算対象の洪水規模・河道状況と粗度係数設定対象のそれらとの違いを踏まえ、物理的な粗度係数推定法を加味して、最終的に粗度係数を設定するというものである。

なお、物理的な粗度係数推定法の適用が難しい河道については、粗度係数逆算結果を重視した粗度係数設定を行うこととなる。この例として、岩河道、土丹が露出した河道などが挙げられる。逆に、逆算のためのデータが存在しないまま設定せざるを得ない場合は、物理的な推定法のみ適用や、それが難しい場合には、類似の河川の粗度係数を十分に吟味した上で適用することも現実的な選択肢となる。

粗度係数を支配する要因とその影響度が複雑で、精度の良い洪水観測が必ずしも容易でない実河川を対象としていることから、適切な粗度係数設定を行った場合でも、種々の誤差、不明

確な要素を粗度係数から完全に除去することは困難と考えるべきであり、一般的には粗度係数の有効数字は2桁が限度である。粗度係数の設定や設定した流れ場の解析結果の解釈と利用においては、粗度係数を含みうるこのような誤差、不確実性を十分考慮しなければならない。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp.87-92，p.117，pp.182-184，pp.206-209，pp.212-218.
- 2) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp.97-118，2001.
- 3) (財)リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp.98-103，pp.118-120，1999.

5.3 逆算による同定の方法

5.3.1 逆算に用いるデータセットの種類

<考え方>

粗度係数の逆算に用いるデータセットとして、以下の3種類を用いる。データセット1)、2)は、第2章 水文・水理観測 第1節 総説 で述べたカテゴリー1.2による観測データ群であり、3)はカテゴリー3.1の河川の流れの総合的把握のための観測データ群である。

1) 時間的には疎であるが、空間的に密に計測された水位データ

代表的なデータとしては、第2章 水文・水理観測 第3節 水位観測 3.9に示す洪水痕跡水位が挙げられる。

2) 空間的には疎であるが、時間的には密に計測された水位データ

代表的なデータとしては、第2章 水文・水理観測 第3節 水位観測 3.4に示す水位観測所の水位データが挙げられる。

3) 時間的・空間的に密に計測された水位データ

代表的なデータとしては、第2章 水文・水理観測 第7節 河川の流れの総合的把握 に示す水位時間変化の縦断方向多点観測結果が挙げられる。

5.3.2 データセットに応じた同定

<標準>

1) 共通事項

1断面内に複数の粗度係数（低水路と高水敷など）を設定する場合には、1回の逆算で1断面内の全ての粗度係数を逆算することはできない。そのような場合には、次のように算定するのを標準とする。

種々の規模の洪水について逆算を行い、実測値に合う粗度係数の組合せを見いだす。たとえば、低水路満杯時の洪水で低水路粗度係数を逆算し、それよりも高い水位の洪水から高水敷上の樹木や草本植物の粗度係数を求める。この場合は、洪水規模による粗度係数の変化、対象とした各洪水発生時の粗度状況の違いを無視できることが適用条件となる。

また、水位に対する影響が支配的でなく、粗度状況からの物理的推定の信頼性が比較的高い粗度係数の値を逆算時に既知として与え、この条件に該当せず逆算する必要性が高い1つの粗度係数だけを対象に逆算を行う。たとえば、高水敷の粗度係数値を植生地被からの推定により与え、低水路粗度係数だけを逆算の対象とする場合等がこれに当たる。この場合は、既知として与える粗度係数値の誤差によって、逆算した粗度係数の精度が決まる。

2) データセット1を用いた同定法

この同定法では、河道の長い区間の平均的な粗度係数が得られる。「河道の長い区間」の一つの目安としては河道特性が同一と見なせる単位であるセグメント区間が挙げられる。逆算においては、平均的な粗度係数を算定する本同定法が用いられることが多いが、これは対象区間の平均的な粗度係数を設定することにより、河道計画の策定などに使用できる精度で水位計算を行うことができるからである。

長い河道区間の平均的な粗度係数を逆算する場合、河道及び洪水流の特徴に応じて、本章 第3節 3.2 に述べたように不定流計算と不等流計算を使い分ける。なお、一次元・準二次元流解析によって逆算する場合には、左右岸の痕跡水位の平均値と水位計算値を比較する。

3) データセット2を用いた同定法

この同定法では、水位観測所の水位データを用いるのが一般的であり、その場合、水位観測所地点間の平均的な粗度係数が得られる。

河道の長い区間内に多地点の水位観測所が設置されている場合には、各観測所の最高水位に対して、上記2)で述べた痕跡水位に対する手法によって粗度係数の逆算を行う。

また、同一のセグメント区間内に近接した2地点で水位観測所等により水位データが得られる場合には、等流計算又は不等流計算によって粗度係数を逆算できる。「近接した2地点」の一つの目安としては2地点間の流量が同一と見なせることが挙げられる。この場合、最高水位のみならず水位の時間変化にも適用できるため、粗度係数の時間変化が把握できる。

この逆算において、大きな誤差をもたらす可能性が高いのは水面勾配である。水位測定精度（又は誤差）に比べて2地点間の水位差を十分に大きくとれない場合には、水面勾配の精度を確保することが難しく、逆算粗度係数の誤差が大きくなる。

上記の観点からは、水位差を大きくするためにより離れた水位観測所間で粗度係数の逆算を行うことが望ましい。ただし、2地点間の距離を増すと粗度状況や河道形状の一様性が保ち難くなり、等流計算では逆算粗度係数の精度が低下する場合がある。その際には、不等流計算を適用することで原理的には精度低下が抑えられるが、距離を増すことで2地点間の流量が同一とはみなせなくなった場合には、その限りではない。

一般に上記した要件を全て満たすのは、特に河床勾配の緩い河道区間において困難であり、そのため一定の誤差が含まれ得る。

なお、本手法で同定した粗度係数をより長い区間の平均的な粗度係数として用いる場合、上下流の長い区間をも代表し得るか十分に吟味し、その適用を慎重に行う必要がある。

<例 示>

4) データセット3を用いた同定法

この同定法では、解析の対象とする洪水時の水面形を不定流計算によって再現計算し、水面形の時空間的な変化を多地点かつ高頻度の水位観測結果とできるだけ一致するように粗度係数を逆算することで、粗度状況別に粗度係数の同定を行うことができる。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成11年版]，土木学会，丸善，p.117，1999.
- 2) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp.97-118，2001.

<参考となる資料>

データセット1、2を用いた粗度係数の逆算については資料1)が、データセット3)を用い

た解析事例については資料 2) が参考となる。

- 1) 建設省河川局治水課, 建設省土木研究所: 河道特性に関する研究, 第 42 回建設省技術研究会報告, pp. 761-791, 1988.
- 2) 福岡捷二, 渡邊明英, 田端幸輔, 風間聡, 牛腸宏: 利根川, 江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数, 樹木群透過係数の評価, 水工学論文集, 第 50 巻, pp. 1165-1170, 2006.

5. 4 粗度状況による推定の方法

5. 4. 1 推定の基本的な考え方

<考え方>

移動床に洪水が作用すると、小規模河床波の消長により粗度係数が大きく変化することがある。この傾向は砂床河川で顕著であるが、礫床河川でも無視できない場合がある。以下では、出水中の河床変化が顕著でない場合の粗度係数の推定法と小規模河床波の発生を伴う場合の粗度係数の推定法に分けて記述する。また、河川構造物の抵抗の推定法についても併せて記載する。

5. 4. 2 出水中の河床変化が顕著でない場合の粗度係数の推定法

<標準>

1) 河床等の裸地面における粗度係数

河床材料の移動が生じず平坦な固定床として取り扱える場合には、河床材料の粒径、水深等に基づいて粗度係数を推定するのを標準とする。固定床として扱える場合の粗度係数の推定は水理公式集[平成 11 年版]による。

2) 人工水路等の粗度係数

人工水路においては、固定床面の凹凸等の粗度状況に応じて粗度係数を推定するのを標準とする。推定に当たっては、水理公式集[平成 11 年版]による。

3) 草本植物・樹木の粗度係数

河床や高水敷が草本植物・樹木により覆われている場合、草丈等の繁茂状況と水深等の水量に基づいて粗度係数を推定するのを標準とする。推定に当たっては、河道計画の検討の手引き及び河川における樹木管理の手引きによる。

4) 護岸等の粗度係数

のり覆工、根固工の主構成材料（ブロック、礫等）の相当粗度等の粗度状況に基づいて、粗度係数を推定するのを標準とする。推定に当たっては、護岸の力学設計法による。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会: 水理公式集[平成 11 年版], 土木学会, 丸善, pp. 87-91, pp. 206-209 及び pp. 214-215, 1999.
- 2) (財)国土技術研究センター: 河道計画検討の手引き, 山海堂, pp. 114-118, 2001.
- 3) (財)リバーフロント整備センター: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp. 99-100 及び pp. 118-120, 1999.
- 4) (財)国土技術研究センター: 護岸の力学設計法, 山海堂, pp. 132-133, 2000.

5. 4. 3 小規模河床波の発生を伴う場合の粗度係数の推定法

<標準>

小規模河床波（平坦河床を含む）を伴う河床の粗度係数の推定には、実用的な観点からは、次元解析や土砂水理学の知見を用いつつ、実験や観測結果から何らかの法則性を導き出すというアプローチが主流である。これには主として実験結果に基づき小規模河床形態の領域区分ごとに抵抗則を示した方法、実験結果に河川の観測データを加え、河川に生じ得る幅広い水理条件、河床材料の粒径範囲について流速係数、無次元掃流力、水深粒径比の関係を示した方法がある。小規模河床波を伴う河床の粗度係数の推定は、これら方法を用いるのを標準とする。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp. 91-92, pp. 182-184, 1999.
- 2) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp. 97-109, 2001.

5. 4. 4 河川構造物の流体力の推定法

<標準>

水制や橋脚等の河川構造物が河道縦横断方向の水位・流速分布に与える影響を評価する場合、洪水流の解析においては河川構造物の具体の形状は与えずに流体力としてのみ反映する手法を用いる（たとえば、式(5-4-15)、(5-4-16)、(5-4-21)、(5-4-22)の F_x 、 F_y がこれに該当）。その際、各種構造物の諸元に応じた適切な抗力係数、揚力係数を用いた経験則に基づいて推定するのが標準とする。推定に当たっては、水理公式集[平成 11 年版]による。

<関連通知等>

- 1) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成 11 年版]，土木学会，丸善，pp. 212-218, 1999.