

洪水時のヨシ群落の力学的特性を考慮した 河道水理検討手法に関する考察

—庄内川におけるH12.9月洪水の再現を通して—

A STUDY CONCERNING THE RIVER HYDRAULIC EXAMINATION
METHOD WHICH CONSIDERS THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF
REED COMMUNITY AT THE TIME OF THE FLOOD

—THROUGH REPRODUCTION OF THE FLOOD IN THE SHONAI RIVER IN SEPTEMBER OF 2000. —

宮崎誠¹・本多信二¹・川瀬宏文²・栗村直彦²・鬼頭政徳²

Makoto MIYAZAKI, Shinji HONDA, Hirofumi KAWASE,
Naohiko AWAMURA and Masanori KITO

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 水工技術本部 河川部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

²正会員 国土交通省 中部地方整備局 庄内川河川事務所 調査課 (〒462-0052 名古屋市北区福德町5-52)

In September of 2000, the Shonai river was attacked by the Tokai storm, which reached the recorded maximum scale, and a design channel for the Shonai river was needed to be planed reflecting the channel characteristics. In determining this design channel, channel characteristics such as roughness coefficient of high-water channel and boundary mixing coefficient are established through reproduction of the September 2000 flood, the discharge capacity of the present channel is appropriately estimated based on these channel characteristics, and conservation of the downstream reed field is considered from an environmental point of view.

With this examination, through reproduction of the flood from the river which has large scale high-water channel where reed community is thick, the necessity of using the up-to-date knowledge for establishing the coefficient of roughness of high-water channel is described, as well as the rational setting method of boundary mixing coefficient between a low-water channel and a high-water channel is studied.

Key Words : *dynamic model of reed, roughness coefficient of high-water channel, boundary mixing coefficient*

1. はじめに

平成12年9月に名古屋市を中心とする中部地方一帯を襲った東海豪雨は庄内川支川新川の破堤, 庄内川本川の一部区間溢水等により, 甚大な被害をもたらした。

庄内川においては, 既往最大規模となったこの平成12年9月洪水の洪水再現を通して, 高水敷粗度係数, 境界混合係数等の河道特性を設定し, この河道特性に基づく現況河道の流下能力の適切な評価を行って計画河道の策定を行う必要が生じた。

本検討では, 河川環境保全上の観点からも特に重要となった庄内川下流部8km区間—広大な高水敷上にヨシ群落が繁茂する区間—の洪水再現を通じて, 高水敷粗度係数設定のために最新の知見を用いることの必要性を述べるとともに, その際の低水路・高水敷間の境界混合係数の合理的な設定方法について考察した。

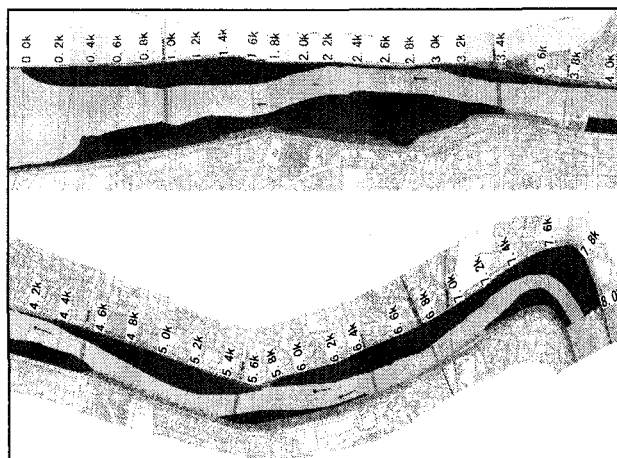


図-1 庄内川0.0~8.0km区間平面図

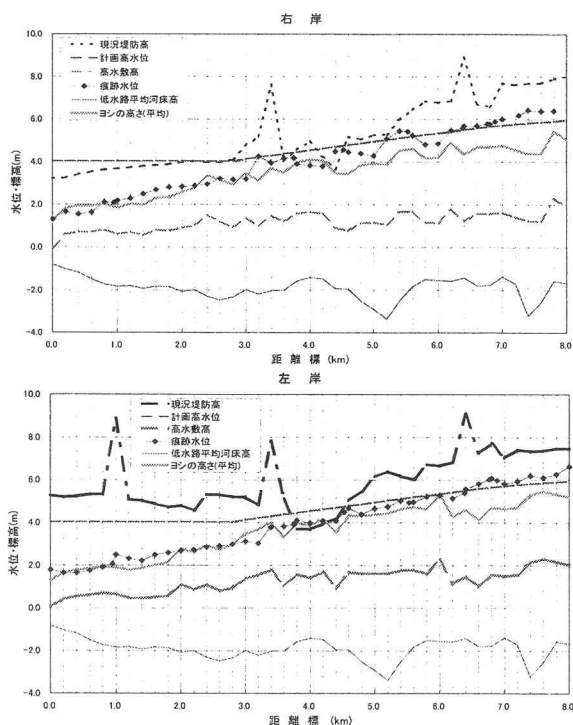


図-2 H12.9月洪水痕跡水位とヨシの縦断の高さ等

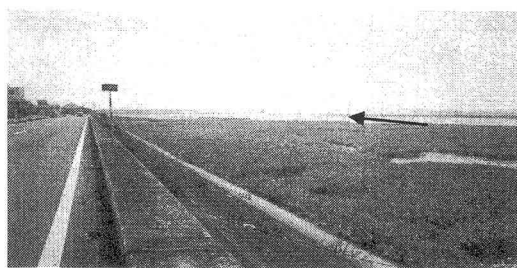


図-3 洪水直後のヨシ群落の状況 (0.6k付近：非倒伏)

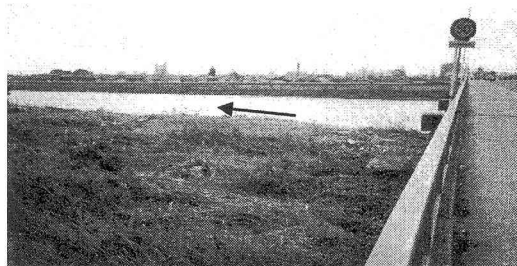


図-4 洪水直後のヨシ群落の状況 (4.5k～色大橋付近：倒伏)

2. H12.9月洪水における庄内川下流域の河道の状況

庄内川下流域0～8km区間は、図-1に示すように幅200m程度にも及ぶ広大な高水敷が左右岸に広がり、高水敷上に高さ1～3m程度のヨシが密生している。

H12.9月洪水時には、図-2に示すように4～8km区間においてH.W.L.と同等の痕跡水位が発生しており、洪水直後の調査によって、図-3に示すように0～4km地点付近までのヨシは非倒伏、図-4に示すように4～8km地点までのヨシは倒伏していることが確認されている。

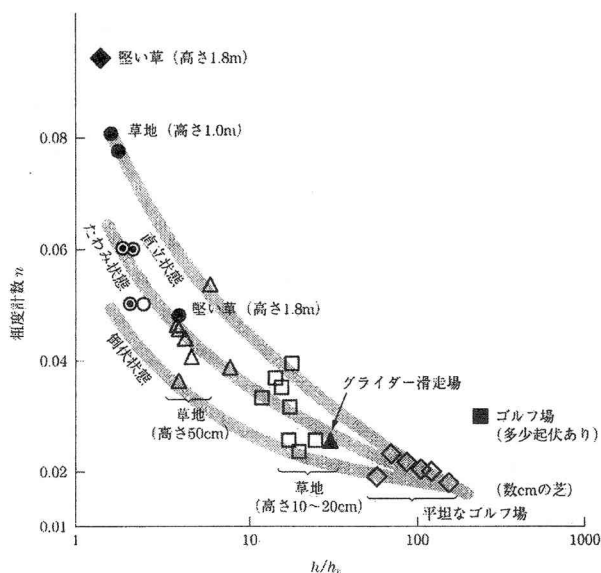


図-5 高水敷の植生の状態と水深と粗度係数の関係

3. 既往の河道条件設定手法によるH12.9月洪水の再現計算

(1) 既往の河道条件設定手法

a) ヨシ等草本類の高水敷粗度係数の考え方

現在、河道の準二次元不等流計算を行う際の高水敷上の植生に応じた粗度係数の設定手法として、図-5に示すような水深 h 、草丈 h_v と粗度係数 n との関係図が提唱され、「河道計画策定の手引き」等で紹介されているが、同図を用いた粗度係数の設定には主に下記のような課題がある。

- ① h/h_v が2程度より小さい領域—すなわちヨシ等の高茎草本類—について粗度係数の適切な評価ができない。
- ② h_v は倒伏前の草丈であり、洪水外力による草丈の変化—すなわち倒伏のメカニズム—が粗度係数設定に反映されていない。

b) 境界混合係数の考え方

高水敷を有し、高水敷上に樹木等が密生する複断面河道の準二次元不等流計算を行う際の境界混合係数の設定手法としては、現在図-6に示すような方法が提唱され、「河道計画策定の手引き」等で紹介されている。

この設定手法には主に下記のような課題がある。

- ① ヨシ等の高茎草本類が低水路・高水敷境界まで密生しているような状況で、前述の図-5の関係を用いて高水敷粗度係数を高水敷地面上の値として与える場合の境界混合係数の設定に関する考慮がなされていない。

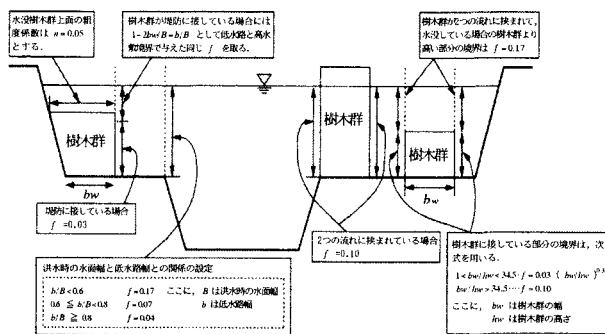


図-6 標準的な境界混合係数 f の値

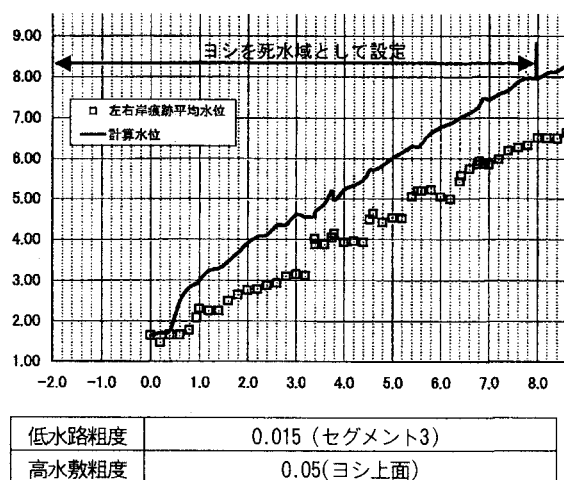


図-7 H12.9洪水再現計算結果
(既往の河道条件設定手法による)

(2) 再現計算結果

H12.9月洪水について、最初に(1)で述べた既往の河道条件設定手法による準二次元不等流計算を行い、痕跡水位の再現を試みた。

河道条件の設定にあたっては、図-5において h/h_v が2程度の場合の粗度係数値の評価があまり適切でないことを踏まえ、基本的に図-6で示したように密生するヨシ群落を死水域とみなし、その上面粗度として $n=0.05$ を与え、低水路・高水敷間の境界混合係数については図-6で示す標準値を与えた。

上記の河道条件での再現計算結果と痕跡水位(左右岸平均値)とを比較したものを図-7に示す。

図から再現計算水位は痕跡水位から大きく逸脱する結果となり、痕跡水位を良好に再現することができなかった。

このような痕跡水位と計算水位の乖離は、(1)で述べたような既往の河道条件設定手法における課題がそのま原因となって生じたものと言える。

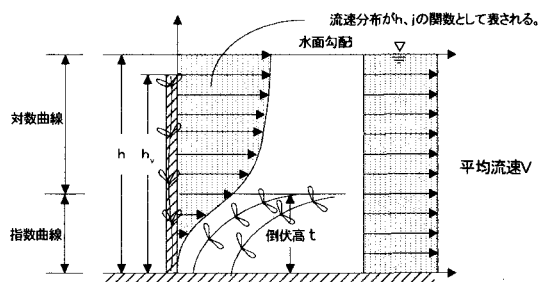


図-8 ヨシ群落の流速分布

4. 河道条件設定手法の修正によるH12.9月洪水の再現計算

(1) ヨシの力学的解析モデルによる高水敷粗度係数の設定

ヨシ等草本類の洪水外力によるたわみ挙動の力学的解析方法としては、基本的にヨシを片持ち梁と見なし、その有限変形としてモデル化する考え方が一般的となっているが、本検討では服部ら¹⁾が提案している茎と葉に作用する抵抗を個別に評価でき、ヨシ群落の密生の度合いに応じた流れの透過、およびヨシの根本の降伏を考慮することができるモデルを採用することとした。

同モデルでは、ヨシに作用する抗力 F_D 、揚力 F_L をそれぞれ式(1)、(2)のように与えている。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \left(C_D + C_{DL} \frac{A_L}{2L_0 d} \right) d U^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \rho \cdot C_{\mu} \frac{A_L U^2}{L_0 \cos \theta} \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho \left(C_D + C_{DL} \frac{A_L}{2L_0 d} \right) d U^2 \cos^2 \theta \sin \theta \quad (2)$$

L_0 : ヨシの直立高, A_L : 葉の総面積, d : 茎の径
 C_D, C_{DL}, C_{μ} : 葉と茎の抵抗係数、葉の摩擦抵抗係数
 $(C_D=1.0, C_{DL}=0.095, C_{\mu}=0.015)$

また図-8に示すようなヨシ群落の流速分布について、ヨシ内部の分布を式(3)、倒伏高 t 上部の分布を式(4)のように与えており、最終的に式(3)~(7)より、 t, θ を与えて流速分布式を決めるようになっている。

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{u_0 \cdot \psi_0}{x} \left[3 \left(\frac{1 + ce^{\alpha \eta}}{1 - ce^{\alpha \eta}} \right) - 2 \right], \quad \eta = \frac{z}{t} - 1, \quad \chi = \frac{u_0 \cdot \psi_0}{k t^{0.5}}, \\ c &= \frac{\sqrt{\chi + 2} - \sqrt{3}}{\sqrt{\chi + 2} + \sqrt{3}}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{2\chi}{\varepsilon}}, \quad \varepsilon = \frac{u_0 \cdot \psi_0 \cdot \nu_t}{t^2 \cdot g \cdot i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$u = u_0 \cdot \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left\{ \frac{\kappa(z-t) + L}{L} \right\} + \psi_0 \right] \quad (4)$$

$$K = \left(\frac{g \cdot \rho \cdot u^2}{N \cdot F_D} \right) \quad (5)$$

$$\nu_t = L \cdot u_0 \quad (6)$$

$$\psi_0 = \frac{\chi \cdot t}{12 L} \frac{(1-c)^3}{\alpha c(1+c)} \quad (7)$$

u_0 : 倒伏高 t における摩擦速度
 ψ_0 : 倒伏高 t における流速係数
 K : ヨシ群落の透過係数
 N : 単位面積あたりのヨシの本数
 ν_t : 渦動粘性係数, κ : カルマン定数
 L : ヨシ群落上での混合距離
 $\chi, C, \alpha, \varepsilon$: 係数

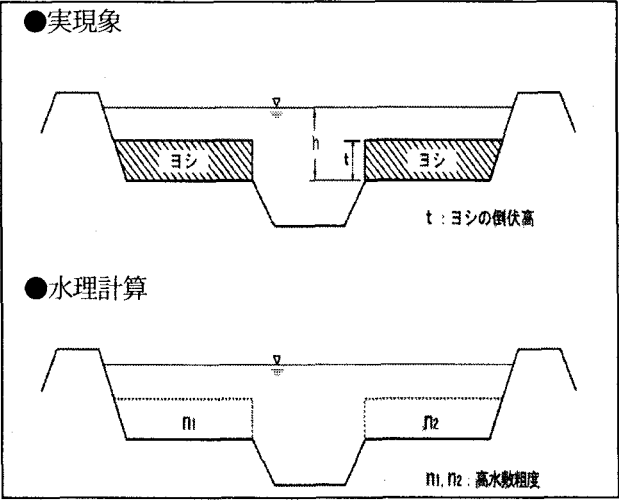


図-9 実現象と水理計算上の取り扱いの違い

倒伏量(t , θ)に関する解析は基本的に室田ら²⁾と同様であるが、根本の曲げモーメント M_0 の算出について、根本の降伏を考慮し、式(8)のように与えている。

$$M_0 = k\theta_0 \quad (\theta_0 \leq \theta_{0cr}), \quad M_0 = k\theta_{0cr} \quad (\theta_0 \geq \theta_{0cr}) \quad (8)$$

k : 根本のバネ定数, θ_{0cr} : 倒伏限界角度

(2) 境界混合係数の取り扱い

(1)で述べたヨシの力学的解析モデルに基づく高水敷粗度係数を用いて、本検討のような複断面河道の準二次元不等流計算を行う場合に注意しなければならないことは、ヨシ群落の状態に応じた粗度係数を、高水敷地面上の粗度係数として設定することである。

すなわち図-9に示すように、実現象では、たわみまたは倒伏したヨシが高水敷上に存在するのに対し、水理計算上は、便宜上ヨシを取り払うかたちで高水敷粗度係数を設定することになる。

図-9で示すようなかたちで水理計算を行う場合、低水路・高水敷間の境界混合係数は、図-6に示したような標準値が用いられることになる。

しかしながら実際には、ヨシが高水敷に存在し、低水路流れと高水敷流れを遮断する役目を果たすため、ヨシの倒伏高と冠水深との比に応じた境界混合係数の低減があるものと考えられる。

すなわち、図-9の実現象の図に示すようにヨシの倒伏高 t を、冠水深を $h-t$ とし、境界混合係数の標準値を f_0 とすると、図-9の水理計算において設定すべき境界

混合係数 f は

$$f = f_0 \frac{h-t}{h} \quad (9)$$

で表すことができるものと考えられる。

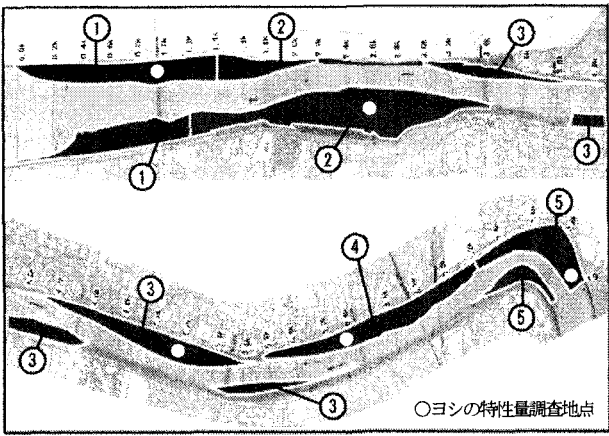


図-10 ヨシ群落の一連区間の設定

表-1 庄内川ヨシ群落の力学的特性量

ヨシの採取地点	総草丈 (cm)	茎の長さ hl(cm)	茎径 d (cm)	葉の総面積 (cm ²)	ヨシの本数 N (本/m ²)	茎の曲げ剛性 EI (gf・cm ²)	バネ定数 k (gf・cm/rad)	倒伏限界角度 θ_{0cr} (rad)
1.0km地点	123.2	114.3	0.41	434	109	79,639	4,031	—
2.7km地点	202.7	192.1	0.58	1268	144	286,669	9,629	—
5.0km地点	276.7	267.5	0.78	865	56	1,524,739	21,394	0.85
6.3km地点	311.5	307.4	0.82	1374	40	1,777,737	32,526	0.85
7.9km地点	315.9	302.9	0.79	848	56	1,534,171	23,202	0.9

表-2 ヨシの解析結果

ヨシの採取地点	高水敷水深 h(m)	痕跡水位の水面勾配 i	倒伏高 t (m)	モデルによる断面平均流速 v (cm/s)	vからの逆算粗度係数	判定
1.0km地点	1.6	1/1430	1.0	28.0	0.129	非倒伏
2.7km地点	2.0	1/2140	1.9	8.9	0.384	非倒伏
5.0km地点	3.0	1/920	1.1	100.1	0.069	倒伏
6.3km地点	4.0	1/1750	1.6	72.1	0.083	倒伏
7.9km地点	4.0	1/1750	1.6	67.6	0.089	倒伏

(3) 再現計算結果

H12.9月洪水の再現計算に当たって、(1)で述べたヨシの力学的解析モデルに必要な庄内川ヨシ群落の力学的特性量を現地調査により設定した。設定にあたっては200 m間隔で高水敷の概況を調査し、高水敷の連続性、ヨシの草丈、密生の度合の均一性等から、図-10に示すようにヨシ群落を5つの一連区間に分割し、それぞれの区間を代表していると考えられる地点において、現地計測、試料の収集を行った。

図-10に示した分割に従って調査した各区間のヨシの力学的特性量を表-1に示す。またその特性量を用いて高水敷水深 h 、痕跡水位の水面勾配 i を与えて力学的解析モデルで解析した高水敷粗度係数結果を表-2に示す。

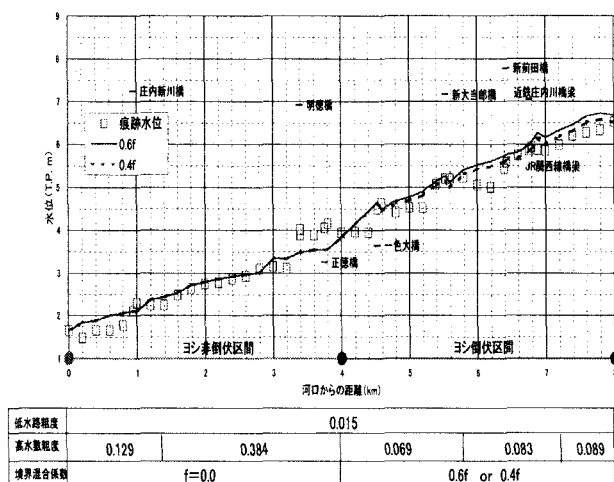


図-11 H12.9月洪水再現計算結果

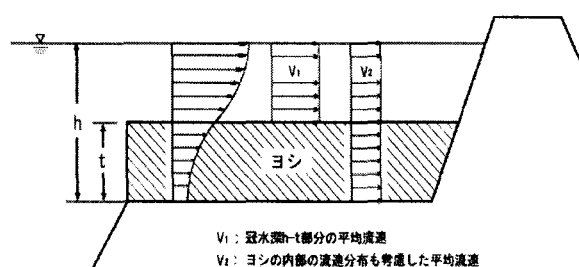


図-12 ヨシ群落内外の平均流速の違い

表-2の解析結果から、洪水後調査におけるヨシの倒伏、非倒伏の区間と計算上の倒伏、非倒伏区間とはほぼ一致している。

また同表の高水敷水深 h と倒伏高 t の関係から、式(9)の考え方に基くと、0~4kmの非倒伏区間の境界混合係数はほぼ0となり、4~8kmの倒伏区間の境界混合係数は標準値の60%程度となるものと考えられる。

表-2に示した高水敷粗度係数、およびヨシの非倒伏区間に境界混合係数0、倒伏区間に境界混合係数の標準値の60%値を与えた場合の再現計算結果を図-11に示す。

図-11からわかるように、既往の河道条件設定手法を用いた計算よりも痕跡水位を良好に再現することができた。

ここでヨシの力学的解析結果からは、境界混合係数は標準値の60%程度となるが、図-11の結果からもわかるように、境界混合係数を標準値の40%程度とした方がより痕跡水位の再現性が高いことが分かる。これは次のような理由によるものと考えられる。

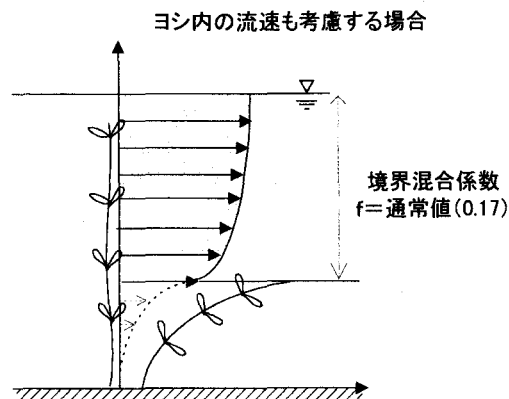


図-13 境界混合係数を修正せずに用いる場合のモデル案

通常、境界混合係数は流速差が生じている面でのせん断力の大きさに寄与する物理量として定義される。本検討においては、図-12からわかるようにヨシ群落の内部までを含めた流速分布の平均流速 v_2 で一連の解析が行われているが、実際に低水路・高水敷間の大きな混合現象が生じるのはヨシ上面の流水部であると考えられ、図-12からこの流水部の平均流速は v_1 であり、明らかに $v_1 > v_2$ である。このため高水敷流速を v_2 で考える場合よりも、 v_1 で考える場合の方が低水路・高水敷間の流速差は小さくなり、計算上、前述のヨシの倒伏高 t と冠水深 $h-t$ の比率に応じた境界混合係数の低減に、この流速差に伴う見かけ上の低減を加える必要があるものと考えられる。

(4) 境界混合係数を修正せずに用いる場合の比較検討

ここで、(3)で述べた再現計算との比較として、境界混合係数を通常考え方のままで使用できる計算について検討してみた。

具体的には、図-13に示すように、倒伏したヨシの内部を死水域と見なし、ヨシ上部の流速分布のみを考慮して、この流速分布から求まる粗度係数をヨシ上面に与えるモデルで水理計算を行った。

結果的に、H12.9月洪水については(3)の再現計算結果と同程度の再現性があることがわかったが、図-13のようにヨシを死水域とみなすと、ヨシの冠水深が大きい大規模洪水については良いが、ヨシの冠水深が小さい中・小規模洪水については、再現性が落ちて水位が非常に高くなってしまったことがわかった。これはヨシを死水域と見なしてしまうことで、中・小規模洪水時に発生しているヨシ内部の流速を表現できなくなるためである。

5. おわりに

以上述べてきたように、準二次元不等流解析における既往の高水敷粗度係数設定手法では、密生しているヨシなどの高茎草本類の洪水時の挙動に基づく値の変動を考慮することができなかつたり、便宜上、ヨシ群落を樹木群を取り扱う場合のように死水域と見なして上面粗度を設定するなどの方法を取らざるを得なかつたりしたため、ヨシ群落が深く冠水するような大規模洪水を良好に再現できなくなる問題が生じた。

本検討では、ヨシの力学的特性量を現地調査により設定し、洪水時のヨシ群落の力学的特性に基づく高水敷粗度係数の設定を行うことによって、高水敷上のヨシ群落内外の水理現象を適切に反映した高水敷粗度係数を設定するとともに、高水敷上にヨシの力学的解析を適用する際の低水路・高水敷間の境界混合係数の修正を考慮した河道水理検討を行うことによって、既往の河道条件設定手法では良好な痕跡水位再現結果が得られないような洪水についても良好な再現結果を得ることができた。

仮に高水敷粗度係数、境界混合係数等に関して既往の設定手法にこだわった解析を行えば、洪水痕跡の再現のために、水理現象として説明のつかない値を設定するようなことになり、現況河道の流下能力の適切な評価を行うことができなくなるとともに、計画高水流量を流下させる計画河道の検討にも悪影響を及ぼすことになる。

以上のような観点から、今回の洪水再現を通じた高水敷水理現象ならびに境界混合係数に関する一連の考察は、今後の庄内川の河道整備全般の検討に資するものと考えている。

最後に、今後本検討のような河道の水理検討を進めてゆくにあたって、ヨシの力学的解析、境界混合係数の設定に関してそれぞれ以下のような課題がある。

高水敷流速が大きくなることによって生じる湧昇流に起因するヨシ先端部の揺動いわゆる“うねり”については、本検討で用いた服部ら¹⁾のモデルでも適用外であり、群落のうねりが高水敷の水理現象にどのように影響してくるのかについて、水路実験や洪水時のヨシ群落の観測

等を通じてモデル化等を行っていく必要があるものと考えられる。

また、本検討で考察した高水敷上のヨシ群落の倒伏高と冠水深との比率に応じた境界混合係数の低減、およびヨシの力学的解析モデルで考えている流速分布と、実際に大きな混合現象が生じているヨシ上面の冠水部分の流速分布との差に起因する境界混合係数の低減は、定性的には妥当であると考えられるが、計算上どの程度の低減を見こめば良いかは、前者の低減については式(9)に示したような提案に止まっており、後者の低減については洪水再現計算時の参考値の算出に止まっている。本検討で行ったような河道水理計算の精度を今後高めていくためにも、これらの諸量の定量的な把握に向けた研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 服部敦, 瀬崎智之, 近藤和仁, 藤田光一: ヨシ群落上流れに関する大型水路実験と抵抗則の検討, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp.616-617, 2000.9.
- 2) 室田明, 福原輝幸: 直立性の植物を有する開水路の流水構造について, 第28回水理講演会論文集, pp.225-231, 1984.2.
- 3) 中川博次, 辻本哲郎, 北村忠紀, 藤井康嗣: 流れによって変形する植生粗度の抵抗則, 水工学論文集第39巻, pp.465-470, 1995.2.
- 4) 辻本哲郎, 北村忠紀: 柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, 土木学会論文集, No.607/ II -45, pp.29-44, 1998.11.
- 5) 高田晋, 石橋良啓, 竹内義幸, 幸弘美, 肥田幸子: 河川における草本類管理について, リバーフロント研究所報告, 第13号, pp.90-97, 2002.10.
- 6) 土屋十國: ヨシ植生帯のある複断面河道における水理, 平成9年度東京都土木技術研究所年報, pp.145-156, 1997.
- 7) 土屋十國, 高崎忠勝: ヨシ植生帯のある複断面河道における水理(その2), 平成10年度東京都土木技術研究所年報, pp.95-102, 1998.

(2003. 4. 11受付)