

水流による高水敷上のヨシ原の倒伏・変形と 粗度係数に関する現地実験

FIELD EXPERIMENTS ON REED DEFORMATION AND FALLING AND
ROUGHNESS COEFFICIENT ON FLOODCHANNEL BY FLOWS

福岡捷二¹・島谷幸宏²・田村浩敏³・泊耕一⁴・

中山雅文⁵・高瀬智⁶・井内拓馬⁷

Shoji FUKUOKA, Yukihiro SHIMATANI, Hirotoshi TAMURA, Koichi TOMARI,
Masafumi NAKAYAMA, Akira TAKASE, Takuma IUCHI

¹フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 国土交通省九州地方整備局 武雄河川事務所所長 (〒843-0023 武雄市武雄町大字昭和745)

³正会員 修(工) 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻

⁴国土交通省九州地方整備局 山国川河川事務所調査課長 (〒871-0026 中津市高瀬1851-2)

⁵国土交通省九州地方整備局 河川部河川管理課係長 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅前2-10-7)

⁶国土交通省九州地方整備局 武雄河川事務所調査課

⁷学生会員 広島大学工学部 建設・環境系

The behavior of reeds on floodchannel during floods is closely related to discharge capacity in rivers. However, the relation between reed deformation and roughness coefficient on floodplain during floods is not known well. In addition, the method to evaluate discharge capacity in rivers with reeds has not been established. The case of the Rokkaku River is an example of floodchannel covered by reeds, so they affect the flow during floods. An investigation on the behavior of reeds and flow was carried out in a straight channel constructed on the floodplain of the Rokkaku River. In this paper, the relation between behavior of reeds and roughness coefficient is described based on the data of the field experiment, and methods to evaluate the extent of reed falling and deformation and river discharge capacity are presented.

Key Words : *Field experiment, reed deformation, roughness coefficient,
non-uniform flow computation*

1. 序論

高水敷上にヨシ等の背の高い草本類が繁茂している場合、洪水時における草本類の挙動及び状態とこれに対する粗度係数の関係、及びヨシの密生する河川の流下能力の評価法は確立されていない。これまで高水敷の粗度係数はそこに存在する植生の高さに影響されるものと考え、洪水観測データから水深と植生高の比と粗度係数の関係が示されている¹⁾。この植生高さは冠水していないときのものであり、洪水時の流れに対応する植生のたわみや倒伏の状況は考慮されていない。この場合、ヨシのような背の高い草本類は流下阻害が過大に見積もられ、粗度係数は非常に大きな値として評価される傾向がある。し

かし、実際の洪水時には流量の増大に伴い、ヨシは直立状態からたわみ、さらには倒伏することになる。建設省土木研究所は²⁾、摩擦速度によって洪水時における草本の状態を直立、わたみ、倒伏の3つに分類し、それぞれの状態における水深と植生高の比と粗度係数との関係を示している。しかし、この植生高は直立時のものであり、粗度係数には洪水時の植生の挙動を考慮したものとはなっていない。また水深/植生高が小さい領域のデータは十分に得られていない。したがって、ヨシのように植生高の大きな草本類の密生した高水敷における洪水時の粗度係数の評価方法が求められている。過去に芦田川におけるオギ原に通水した現地実験が行なわれており、貴重なデータが得られているが、実験水路が単断面で水路全体がオギ原で覆われている流れについてのものであっ

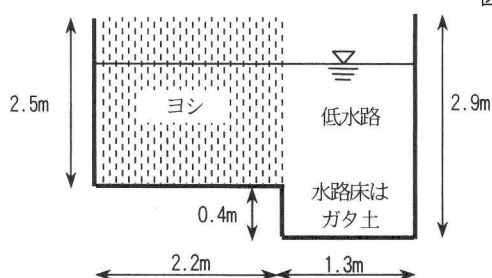
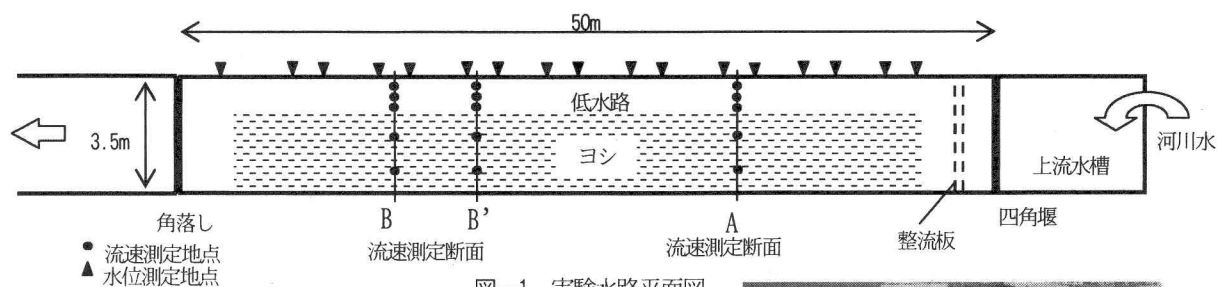


図-2 実験水路横断面図

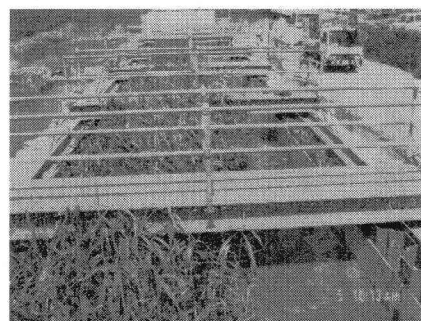


写真-1 実験水路とヨシの状況

表-1 実験条件とヨシの状況

ケース	流量 (m^3/s)	下流端 角落し高 (m)	低水路 平均 水深 (m)	流速測定断面のヨシの状況と平均流速（流速: m/s ）						備考
				断面A			断面B			
				状態	高水敷 平均流速	低水路 平均流速	状態	高水敷 平均流速	低水路 平均流速	
1	0.91	1.4	2.1	直立	0.06	0.15	直立	0.06	0.14	
2	1.78	1.4	2.3	直立	0.10	0.25	直立	0.09	0.23	
3	2.33	1.4	2.3	一部倒伏	0.16	0.29	直立	0.11	0.27	
4	3.13	1.4	2.5	倒伏	0.38	0.56	直立	0.12	0.35	
5	3.70	1.4	2.5	倒伏	0.30	0.42	たわみ	0.16	0.39	
6	3.42	1.2	2.3	倒伏	0.44	0.66	直立	0.18	0.44	
7	3.15	1.5	2.6	倒伏	0.36	0.52	たわみ	0.13	0.30	断面B'
8	2.68	0.8	1.8	たわみ	0.45	0.71	直立	0.21	0.44	断面B'
9	3.91	1.2	2.4	倒伏	0.41	0.61	たわみ	0.25	0.86	

た³⁾。ヨシ原は複断面河道の高水敷上に群生することが多い。このような複断面河道内の流れでは低水路と高水敷上の境界における流れの混合が重要であり、また洪水時の流れを検討する際には高水敷のヨシの挙動と粗度係数の関係、ヨシの状態に対応する低水路と高水敷の境界混合を考慮することも求められる。

本研究が対象とする六角川では、高水敷一面に背の高いヨシが密生しており、洪水時の流下に影響を及ぼしている。このため、洪水時の流れ方及び河道の流下能力を評価する上で、ヨシの挙動と粗度係数の評価が重要となっている。本研究では、六角川の高水敷上に、繁茂したヨシをそのまま有する実験水路を製作し、ヨシ原を有する複断面水路における洪水時の流れを再現し、その流速分布、ヨシの挙動と粗度係数、水面形の関係を明らかにするとともに洪水時のヨシの倒伏領域推定方法および流下能力評価方法について示している。

2. 実験概要

六角川10.2k左岸高水敷上に製作された長さ50m、幅

3.5m、高さ2.9mの直線水路において通水実験を行った。現地実験水路は高水敷上のヨシの繁茂状態を保ち、その周りに矢板を打ち込み側壁に合板をはり付けることによって製作された。通水は河川水を排水ポンプ車を用いて吸い上げ行なわれた。実験水路の概要は図-1,2に示すとおりである。横断面形はヨシが繁茂した高水敷部分とヨシのない低水路からなる複断面形状をなしている。六角川の高水敷計画水深が約2mでヨシの繁茂高が2~3mであることを考慮して水路深さを2.5m、低水路床はヨシ部の水路床から40cm低く、水路床勾配は水平である。水路内のヨシの密生度は縦断的に多少のばらつきがみられるが、水路上・下流端を除けば90~120本/ m^2 である。ヨシの高さは約3.0m、茎径は根元付近で約1cm、1番下の葉までの高さは約2.0m、ヨシ1本あたりの葉の枚数は約10枚、葉の長さおよび幅はそれぞれ40~50cm、4cm前後である。

実験方法は、流量、水深を変化させ、横断面内流速分布、ヨシの挙動と水面形を測定している。流量は稼動ポンプ台数により制御し、水路上流にある四角堰の越流量によって評価している。水深は下流端の角落しの高さの調節によって制御している。実験条件は表-1に示すとおり。

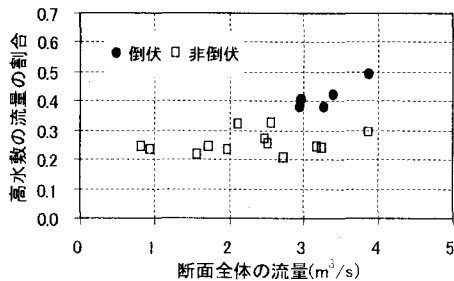


図-3 断面全体の流量に対する高水敷の流量の割合

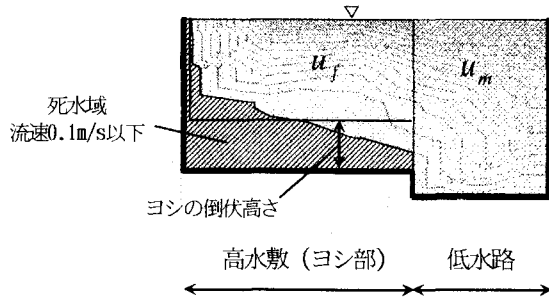


図-4 死水域、ヨシ倒伏高さの設定

りであり、全部で9ケースの実験を行っている。ケース1からケース5までは下流端の角落し高は一定として流量を徐々に増加させている。ケース5からケース8においては下流端の角落し高を変え、流速を変化させている。ケース9は大出水時を想定し、最大流量 $Q=3.91\text{m}^3/\text{s}$ を流下させている。横断面内の流速測定は、図-1に示した断面A、Bの2断面において実施しており、低水路はプライス流速計により15点、高水敷上のヨシ部は電磁流速計により8点の計測を行っている。なお、実験ケース7、8の下流側の測定断面位置は断面B'で行っている。水位測定は、縦断的に約2.5m間隔の17断面で実施しており、低水路側壁に貼り付けた量水板の目盛をビデオカメラによる撮影によって実施している。ヨシの挙動はカメラおよびビデオカメラを用いた撮影により記録するとともに浮子を用いた表面流速測定も実施している。なお、実験ケース9は実験中に異常が発生し流量が大きく低下したため他のケースに比べて測定精度は劣っている。

3. 水流によるヨシの挙動

ヨシは通水開始直後の水深が小さい時には直立したままであるが、流量が増大し水深、流速の増大とともに上流からたわみ、そして徐々に倒伏していく。通水中水没し倒伏したヨシは、通水後に水が排水されると再び起立する。したがって、各実験ケース開始時のヨシの条件はほぼ同様となっている。下流区間のヨシは、全ケースにおいて水面から見えなくなるまで倒伏することはなく直立しているか、たわみ状態となっている。ここで、たわみ状態とは水面から上に突出していないが、水面付近でなびいている状況が確認できるものとし、倒伏状態は水没し水路の上から見えない状態を表している。

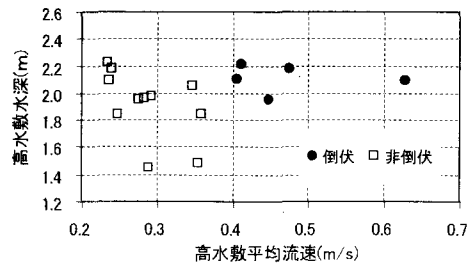


図-5 高水敷上の水深と平均流速の関係

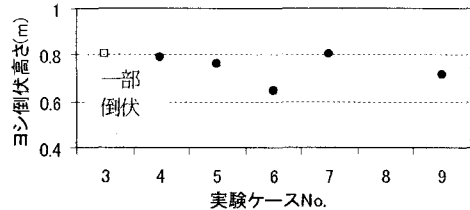


図-6 流速測定断面Aにおけるヨシの倒伏高さ

表-1に示した各実験ケースについてヨシの挙動を調べ、これと水理量との関係について述べる。実験ケース1、2では水路上流端を除いてヨシは直立しており、高水敷上のヨシ内における流れはほとんどなく、流水部分は概ね低水路のみとみなせる。ケース3からケース5にかけて、流量が次第に大きくなり、ヨシが水没、倒伏する領域は上流側から徐々に下流に広がっているが、水路の下流側ではヨシは直立したままとなっている。ケース5から8では下流端の角落し高を変化させている。ケース5ではかなり下流までヨシが水没するが、ケース6ではケース5に比べて角落し高が低くなり、水深が小さくなっているためにヨシの水没領域は減少している。ケース7では角落し高が高く、ヨシの水没領域はケース5に近くなっている。ケース8の角落し高は全9ケースの中で最も低くなっており、流速は大きいが高水敷水深が約1.4mと小さいために、上流端を除いてヨシはほとんど水没せず直立状態となっている。ケース9は全ケースの中で流量が最大でありヨシは水路のほぼ全区間にわたり水没している。

断面内の流速測定結果から流速分布図を作成し、この流速分布図をもとに低水路部、高水敷部それぞれの流量を算出した。図-3は断面内全流量に対する高水敷部流量の割合を示したものである。ヨシが倒伏せずに立っている場合には全流量に対する高水敷流量の割合は小さく、しかも、全流量に対する高水敷流量の割合はほとんど変化せず0.2~0.3となっている。一方、ヨシが倒伏している場合は倒伏しない場合に比べ高水敷流量の割合は大きくなっている。

図-5は高水敷における水深と平均流速の関係、図-6は上流側流速測定断面Aのヨシの倒伏高さを示している。下流側流速測定断面ではヨシが倒伏するケースがなかったためここでは示していない。ここで高水敷の平均流速は、図-4に示すようにヨシが繁茂した高水敷の流速分布において0.1m/s以下の流速部分は死水域をみなし、死水域を除いた流水部分の面積で高水敷流量を除して算出し

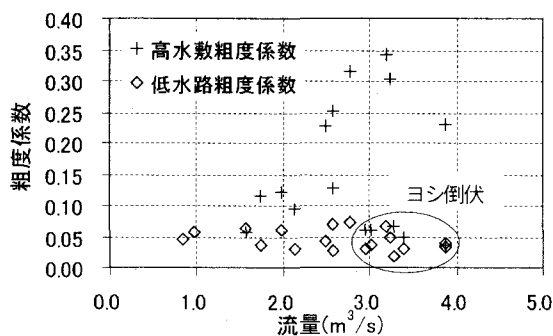


图-7 逆算粗度係数

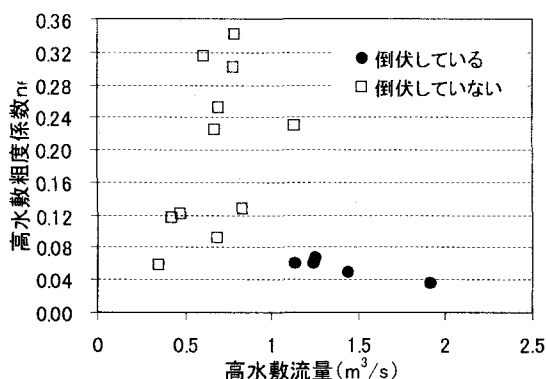


図-8 高水敷における粗度係数と流量の関係

ている。そしてヨシの倒伏時の高さは、高水敷上における死水域を除く流水部分面積をその水面幅で除した流水部分高さをヨシ部の水深から差し引くことによって求めている。図-5,6から高水敷全幅に渡りヨシが倒伏するのは高水敷水深が2m以上、ヨシ上の流速が0.4m/sであることがわかる。ヨシの葉は概ね高水敷から2m以上の高さに存在していることから、葉のついている高さまで水深が大きくなるとヨシは倒伏しないと考えられる。そしてヨシの倒伏高さは高水敷地盤高より概ね0.7~0.8mとなることがわかる。

4. ヨシを有する水路の水面形と粗度係数の推定

(1)粗度係数の推定

流速測定断面において等流を仮定し粗度係数の逆算を行う。粗度係数は低水路部分とヨシが繁茂している高水敷部分それぞれの値を求めることとし、低水路部分と高水敷部分の境界では見かけのせん断力を考慮した力の釣り合い式(1),(2)から算出している^{1),2)}。低水路、高水敷それぞれの平均流速は、流速分布図から低水路、高水敷それぞれの流量を求め、それぞれの流水断面積で除して求めている(図-4参照)。水面勾配は水路の下流側では角落としの影響で水面勾配が大きくなり、下流から上流にかけて水面勾配は小さくなる。したがって、勾配は各流速測定断面付近の水面勾配を用いている。低水路と高水敷の間のせん断力に関する境界混合係数 f は既往研究成果¹⁾から低水路幅と水路幅の比により $f=0.17$ を採用している。

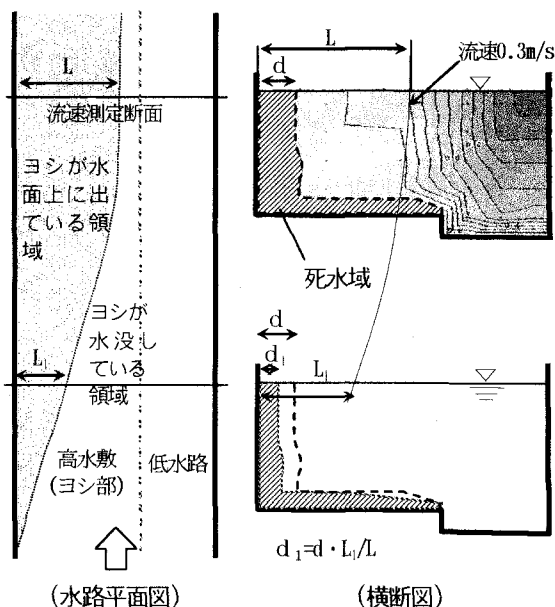


図-9 不等流計算断面の設定

$$\rho g A_f I = -\rho f (u_f - u_m) S_w + \rho g R_f \frac{n_f^2 u_f^2}{R_f^{4/3}} \quad (1)$$

$$\rho g A_m I = \rho f (u_f - u_m) S_w + \rho g R_m \frac{n_m^2 u_m^2}{R_m^{4/3}} \quad (2)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 A は流水断面積、 I は勾配、 f は境界混合係数、 S_w は低水路と高水敷の流水部分の境界の長さ、 R は径深、 n は粗度係数、 u は平均流速であり、添え字 f 、 m はそれぞれ高水敷、低水路を表している。

図-7は逆算粗度係数と断面全体の流量の関係を示している。ヨシが倒伏していない場合には高水敷粗度係数は低水路粗度係数に比べ大きな値となっているが、ヨシが倒伏したケースでは高水敷粗度係数が小さくなり低水路粗度係数の値に近くなっている。図-8は高水敷上の流量と高水敷粗度係数の関係を示している。ヨシが倒伏していない場合にはヨシが倒伏している場合に比べて高水敷上の流量は小さく、粗度係数 n_f は概ね0.10以上となっている。高水敷流量が増大し、ヨシ上水深が大きくなり、水路全幅のヨシが倒伏すると、概ね $n_f=0.05$ の値をとり、この値は、芦田川で行なわれたオギが倒伏した時の粗度係数と同じ値であることが分かる³⁾。

(2)水面形の算定

ヨシを有する区間では流水部分の断面積が変化する。ヨシが直立した状態では流水阻害の程度が大きい、ひとたびヨシが倒伏すれば流水断面積が大きくなり流下能力も増大する。ここではヨシの挙動を考慮した流水断面形状を用いることによって水面形の再現について検討している。流速分布図をもとに断面内死水域の設定および逆算粗度係数を算出できるのは流速測定を実施している2断面のみであるが、不等流計算により水面形を求めるためには、流速測定断面以外の区間において流水断面形状および粗度係数を与える必要がある。ここでは、次の

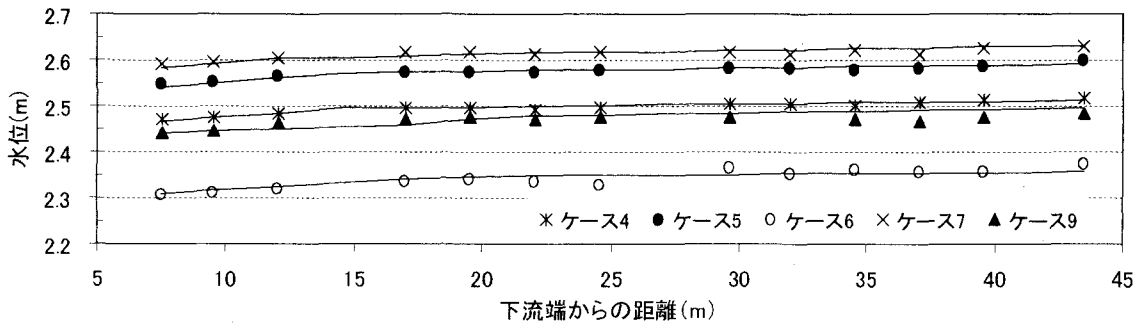


図-10 不等流計算による水面形の再現

ように設定した。ヨシが倒伏している区間には、ヨシが倒伏している上流側流速測定断面Aの流水断面形状および逆算粗度係数を与えている。ヨシが倒伏していない区間では、ヨシが倒伏していない下流側流速測定断面Bの断面内流速分布図と通水中のヨシの状態から流水断面形状を推定して与える。すなわち、実験におけるヨシの状態と断面内流速分布図の関係は、図-9に示すようにヨシが立っている区間では、低水路と高水敷とで流速差が大きくなり、等流速線は鉛直方向に延びる傾向を示す。実験結果より、流速分布の水面付近流速が約0.3m/sの位置を境にヨシが水面上に出ている部分と水没している部分に概ね区分できることが明らかとなった。このことから、ヨシが立っている区間ではヨシが水面上に見える部分（直立、たわみ）と水没部分（倒伏）の境目の位置の表面流速が0.3m/sとなるように、流速測定断面の高水敷上流速分布の等流速線の左岸側壁からの横断方向距離を同比率で修正した流速分布により各断面の流水断面形状を推定することとした。計算区間はヨシが繁茂している区間とし、断面内を低水路と高水敷に分割する準二次元不等流計算²⁾を行う。基礎式は次のとおりである。

$$\frac{1}{gA} \frac{d}{dx} \left(\int u^2 dA \right) + \frac{dH}{dx} + \frac{T_r}{\rho g A} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{T_r}{\rho g A} = \frac{1}{\rho g A} \sum_i \left\{ \frac{\rho g n_i^2 u_i^2 S_{bi}}{R_i^{1/3}} + \sum_j (\rho f u_i^2 S_{wji}) \right\} \quad (4)$$

$$\int u^2 dA = \beta \sum_i (u_i^2 A_i) \quad (5)$$

ここで、 x は流下方向にとった座標、 u は流速、 H は水位、 T_r は流れに与える抵抗、 S_b 、 S_w はそれぞれ底面せん断力が働く潤辺長、分割断面境界の潤辺長、 β は運動量補正係数(=1.0)であり、添え字 i は i 番目の分割断面の量、添え字 j は j 番目の分割断面境界の量を表す。境界混合係数 f は粗度係数逆算時と同様に $f=0.17$ を用いている。ヨシの直立状態と倒伏状態の境界で流水はヨシから力を受けているが、この境界位置の縦断変化は緩やかであるとして本文ではこの力を無視している。

図-10にはヨシが倒伏した実験ケースについて準二次元不等流計算による水面形の再現結果を示している。計算水位は下流から上流に向かって水面勾配は小さくなり、各ケースとも下流端の角落としの影響のため下流区間で

は水面勾配が大きく、上流区間では水面勾配は小さくなっており、水面形の計算結果はこれを表現している。ヨシが倒伏している上流区間は概ね一様な勾配となっており、流速測定した断面における死水域と粗度係数を倒伏区間に与えることで計算による水面形は再現できている。ヨシが立っている下流区間では、前述のようにヨシの状態に合わせて各断面で死水域を設定することにより概ね水面形を再現できる。ただし、ヨシの倒伏区間から直立区間へ変化するところではヨシが直立している場合でも緩和区間と考える必要のあるケースもある。実験No.7の緩和区間(12~20m)の粗度係数は低水路、高水敷それぞれヨシの倒伏区間と直立区間の粗度係数の平均値を与えている。

5. ヨシの倒伏領域の検討方法と全ヨシの倒伏する流量の推算

洪水時におけるヨシの倒伏、非倒伏の範囲の把握は流下能力算定の上で重要である。ここでは不等流計算によって高水敷上のヨシの倒伏領域の推定方法について示し、この方法を用いて実験水路を対象に全ヨシが倒伏に至る流量を推算する。

高水敷上のヨシは低水路側から水没、倒伏し、倒伏領域は徐々に堤防側へ広がっていく。倒伏するか否かの検討は、倒伏領域を考慮した流水断面形状を設定し、準二次元不等流計算による水深と流速を倒伏条件の閾値に対する大きさによって判定することとする。ヨシ原の倒伏領域を考慮して流水断面形状を設定するが、ヨシが一部倒伏している区間では、下流側流速測定断面（たわみ状態、直立）と上流側流速測定断面（倒伏状態）の流水断面形状をもとに図-12のように内挿した断面形状を設定する。粗度係数についても下流側流速測定断面と上流側流速測定断面における粗度係数を低水路、高水敷それぞれ内挿し設定する。ヨシの倒伏領域は流量の増大に伴って低水路際から徐々に下流側へ、そして堤防側へと広がっていくことを想定し、ヨシの倒伏領域がある幅のときに下流方向へ広がる倒伏領域をいくつか設定し（図-11;①→②→③）、その後、流量を増大させ、倒伏幅を広げ、下流へ拡大する倒伏領域を設定する（図-11;③→④→⑤）。

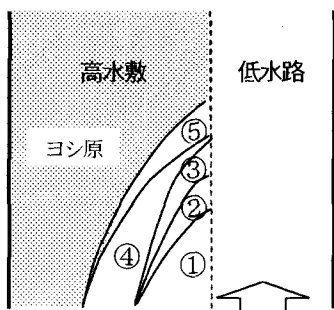


図-11 ヨシの倒伏領域の拡大

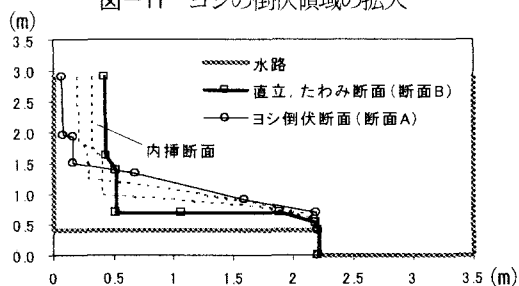


図-12 計算断面の設定

ヨシが倒伏するときの条件として水深、流速に閾値を設け、不等流計算結果と閾値の関係からどの断面が倒伏条件を満たすかどうかを判定する。実験結果から、高水敷平均流速が 0.4m/s 程度であっても高水敷水深が 2.0m 以下の場合にはヨシは倒伏しないことから、ヨシが倒伏する条件としてまず高水敷水深は 2m 以上必要となる。ヨシが一部倒伏する区間では、水面上に現れているヨシの幅が小さいほど、多くのヨシが倒れるために高水敷流速が大きい。流速測定断面において断面内の一部のヨシが倒伏しているときの高水敷平均流速と水面上に現れているヨシの水路左岸側壁からの幅の関係を示すと図-13のようになる。断面内の一部のヨシが倒伏するには図中のデータの少なくとも下限値以上の流速が必要になると考え、ヨシの倒伏範囲の判定には各計算断面で仮定したヨシ幅に対して図-13に示したデータの下限値を閾値に採用することとした。計算法の妥当性を確認するため、実験ケース5について、上流からの倒伏領域を実験の倒伏領域まで計算し、そのときの流量をチェックした結果 $3.8\text{m}^3/\text{s}$ となり、実験時の約 $3.7\text{m}^3/\text{s}$ と同程度となることが確認できた。

この方法を用いて、水路全体のヨシが倒伏するのに必要な流量を求めると表-2のようになる。下流端まですべてのヨシが倒伏する流量は、実験ケース5と7では実験流量に比べ少し大きい値となっている。これは、実験における下流部で倒伏していないヨシの区間長が大きくないことから計算結果は概ね妥当と考える。

以上の方法によって、所定の流量に対するヨシの倒伏領域と水位を推定することができ、河道の流下能力を計算することが可能となる。

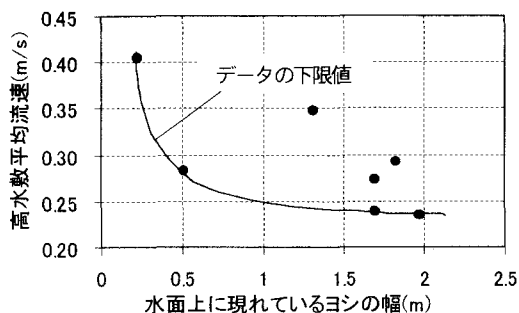


図-13 ヨシの幅と高水敷平均流速の関係

表-2 下流端までのヨシが倒伏する流量

実験 ケース	実験		解析
	流量	倒伏していない下流のヨシの区間長	下流端までヨシが倒伏する流量
5	$3.70\text{ m}^3/\text{s}$	約 13 m	$3.9\text{ m}^3/\text{s}$
7	$3.15\text{ m}^3/\text{s}$	約 8 m	$3.6\text{ m}^3/\text{s}$
9	$3.9\text{ m}^3/\text{s}$	—	$3.9\text{ m}^3/\text{s}$

本文における主な結論と今後の課題について整理すると以下のとおりである。

- (1)本実験水路では、高水敷水深が 2m 以上で高水敷平均流速が 0.4m/s 以上でヨシは倒伏し、その高さは約 0.7m をとる。断面内のヨシの倒伏部分の程度により流速、粗度係数は変化するが、全幅倒伏する場合には高水敷粗度係数は $n=0.05$ 程度となる。
- (2)実験結果から求まるヨシの状態に応じた流水断面形状と逆算粗度係数を用いることにより水面形が概ね再現できた。
- (3)ヨシの倒伏領域の推定方法を提示し、実験水路の全ヨシが倒伏するときの流量を推算し、その妥当性を示すとともに流下能力算定方法を示した。

本文における流れの計算法やヨシの倒伏判定方法については、今後、さらに現地データを用いて詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 建設省河川局，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，773pp，1988。
- 2) (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，p.93-110，1999。
- 3) 福岡捷二，渡邊明英，盛谷明弘，日比野忠史，大村靖人：オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性，第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集，pp.245-250，1997。
- 4) 福岡捷二，藤田光一：複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用，土木学会論文集，第411号／II-12，pp.63-72，1989.11。
- 5) 福岡捷二，藤田光一，新井田 浩：樹木群を有する河道の洪水水位予測，土木学会論文集，第447号／II-19，pp.17-24，1992。

6. 結論

(2003. 4. 11受付)