

岩岳川実験河川での洪水追跡によるヨシの密生した河道の粗度係数の評価

INVESTIGATIONS OF ROUGHNESS COEFFICIENTS OF THE RIVER CHANNEL WITH REED BY FLOOD ROUTING IN THE IWATAKE RIVER

赤司信義¹・石川誠²・嶋田浩史³・藤田英輔⁴・和泉大作⁵・坂本洋⁶・徳永智宏⁷
Nobuyoshi AKASHI, Makoto ISHIKAWA, Hiroshi SIMADA, Eisuke FUJITA,
Daisaku IZUMI, Hiroshi SAKAMOTO and Tomohiro TOKUNAGA

- ¹ 正会員 工博 西日本工業大学教授 工学部環境都市デザイン工学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津 1-11)
² 正会員 工学 西日本工業大学講師 工学部環境都市デザイン工学科 (〒800-0394 福岡県京都郡苅田町新津 1-11)
³ 福岡県豊前土木事務所 (〒828-0021 福岡県豊前市八屋 2007-1)
⁴ 福岡県豊前土木事務所 (〒828-0021 福岡県豊前市八屋 2007-1)
⁵ ㈱建設技術研究所 九州支社環境都市部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12 CTI ビル)
⁶ 正会員 ㈱建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12 CTI ビル)
⁷ 正会員 ㈱建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12 CTI ビル)

This paper deals with roughness coefficients of the river channel in which reeds are grown thickly. Roughness coefficients are investigated by both calculations of the non-uniform flows and calculations of flood routing. The field observations of flood were made, using the experiment channel, which has a length of 200 meters, covered with stones made in the middle reaches of the Iwatake River. The artificial floods flows by opening the gate of reservoir. The flowing times through the gate were about 10 minutes. The water depths were observed with the space of about 100 meters. In the numerical calculations, the 2 steps Lax-Wendroff method and the MIKE11 were used. It is shown that roughness coefficients of the river channel with dry masonry are about 0.04 and that roughness coefficient of the channel with reed is about 0.2. The ratios of water depth to reed length were about a quarter.

Key Words: roughness coefficient, river channel with reed, dry masonry, field observation
flood routing

1. はじめに

河川整備には地域の特性を活かした自然との調和の取れた整備が必要となる。調査対象の豊前築上地域の河川は、勾配が急で、河床は大小の転石で構成されている礫床河川となっている。平常流量が少なく、大型の抽水植物の繁殖しやすい環境となっていて、全断面に渡って、ヨシが繁茂する区間は珍しくない。転石・礫などの河床やヨシの植生帯は多様な生物の生息環境を担っていて、これらの環境を保全する上で、洪水時の流下能力への影響を適切に評価することは重要である。これまでに、転石河道¹⁾やヨシなどの植生に関する粗度係数^{2), 3), 4)}の評価に関する研究も多くなされている。現地実験に基づく研究は福岡や島谷^{5), 6)}によって行われているが全断面に密

生した場合の研究はあまり見られない。ヨシの粗度係数の評価を行う場合、水深と植生高との比やヨシによる河道断面内の占有率などの考慮が必要であるが、これまでのところ、まだ十分に明らかになっていない。

本研究での現地実験は、福岡県豊前市を流れる二級河川岩岳川に整備された実験河川を利用して行われた。実験河川区間は中流部の河口から8.5km地点に本川に隣接して設置されている。自然材料、特に自然石を利用した石組みの治水工法の実証・実験と河川改修等による生物の回復調査を行う目的で整備されたものである。

本研究は、実験河川での人工出水を利用して下流河道への洪水伝播状況を観測し、空石張り構造の河道、ヨシの密生した河道、転石河床の粗度係数と共に、堰貯留による洪水減衰機能を評価することを目的としていて、類似の河道特性を持つ中小河川の洪水流下能力の評価に役

立てようとするものである。なお、下流河道の植生はツルヨシであるが、本文ではヨシと総称することにする。

本研究では、ヨシの密生区間での植生調査を行うと共に、空石張り構造の河床の粗度係数や捨石河床部の掃流力を検証し、不定流計算を行って粗度係数の検討を行っている。計算は陽形式差分法に堰の貯留機能を組み込んだ計算法と陰形式差分法によって行われている。

2. 岩岳川実験河川の実験施設及び実験方法

(1) 実験施設について

岩岳川は、周防灘に注ぐ流域面積 36km^2 、流路延長 20km の二級河川である。河口から 8.5km 地点で樋門により流量調整されて、洪水時は旧本川である放水路を通じて隣接する佐井川へ流下させている。図-1 は、樋門の直下流に整備された岩岳川実験河川の平面図を示している。貯水池側の水路が新設の実験水路でB河道と呼び、右岸側の水路は既存の水路でA河道と呼んでいる。A、B河道は合流して、現河道を流下していく。図-2 は実験河川整備前の平面図を示していて、図中の樋門から①区間に図-1の実験河川が整備されている。図中の①～②区間はコンクリート水路であるが、部分的にヨシが水路内に密生している。②～③区間は、護岸はブロック積み護岸で河床は転石も見られるがほとんどヨシに覆われている。③～④区間では転石混じりの礫床河道となっている。④～⑤区間ではまたほぼ河道全面に渡ってヨシが密生している。下流河道の河床勾配は、 $1/80\sim 1/120$ で、平均的にはほぼ $1/100$ となっている。

実験河川での流量は貯水池の水門操作により調整され、

流量が不足する場合は、樋門の開放により上流からの自流を取り込んで、所定の流量が確保される。A河道には土のうが設置されていて、水門開放によってB河道に流入すると、次第にA河道の流量はほとんど0となる。水門は引き揚げ扉式で、所定の開度に開放するまで $20\sim 30$ 秒程度の操作時間が必要である。最大流量は、貯水池水深が 2m の場合で、 $5\text{m}^3/\text{sec}$ となっている。水門下流の実験河川B河道は、全長 180m で、水平勾配区間 40m 、 $1/15$ 勾配区間 30m 、 $1/1000$ 勾配区間 110m となっていて、断面は水門から 70m 区間で1割勾配、それより下流では2割勾配で、底幅 2m の台形断面である。

実験河川の河床及び護岸には、代表径がほぼ $40\sim 80\text{cm}$ 程度の自然石を水門から 80m 区間に張り詰められている。水門直下流 20m 区間の河床には水門流出による移動状況を調べるため、平均径が $10\sim 15\text{cm}$ 程度の玉石の捨石河床とされ、 80m 地点より下流は素掘り状態となっている。A河道もB河道の整備に合わせて、若干護岸等の掘削が行われたが、ほぼ現状に復旧されていて、素掘り状態となっている。

(2) 実験方法及び実験条件

実験は水門開度をほぼ、 0.2 、 0.3 、 0.5m 程度として、それぞれ初期流量をほぼ 1 、 1.7 、 $2.8\text{m}^3/\text{s}$ に設定して行われた。水位の時間的変化は、貯水池、勾配急変地点 (40m 地点)の直上流、急勾配地点 (60m 地点)に水圧計を設置し、動歪計、AD変換器、パソコンに接続して計測された。実験河川区間より下流河道の水位変化を観測するため、ほぼ 100m 間隔で観測者をつけ、スタッフを水中に固定して目視により計測した。水門の開放時間は 10 分程度

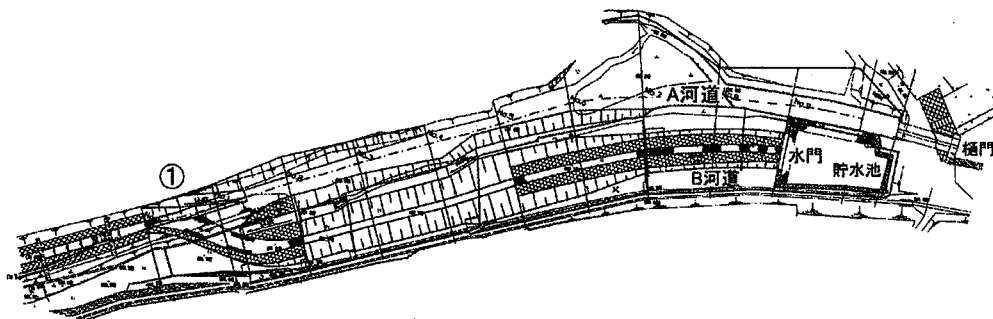


図-1 実験河川

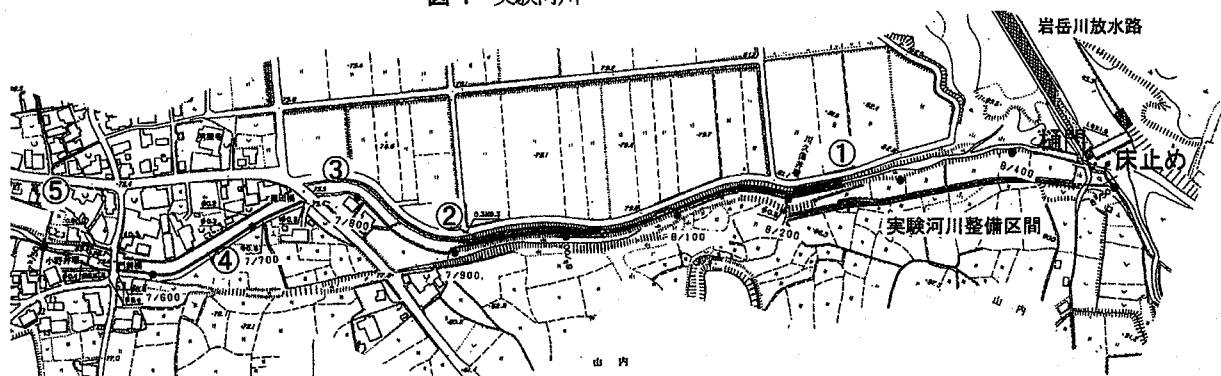


図-2 実験河川の位置関係と下流河道

とし、水門開放前には樋門の開度を一定にしておき、貯水池への流入量が一定になるようにした。水門開放によって貯水池水位がある程度低下すると水門を閉塞した。貯水池への流入量は、水位が低下した状態で水門を閉塞した後の貯水池の水位上昇過程を計測し、水位と貯水量の関係を用いて、算定された。

3. 空石張り河道の不等流計算と安定状況

自然石からなる河床の粗度係数は、代表粒径や水深と関係づけて示されていて、代表粒径が40~80cmの場合、粗度係数は0.035~0.04とされている。ここでは、従来の知見を検証するため、不等流計算と不定流計算によって、粗度係数の評価を行う。

(1) 不等流計算結果について

図-3は、粗度係数を $n=0.035$ として、実験河川の上流の床止め、取り付け部の樋門、貯水池、水門を経て、下流までの河道区間の計算結果を示したものである。A、B河道合流点となる下流端は、高さ20cmの堰を越えて下流河道に流下する流れとなっていて、支配断面となっている。図-4は、勾配急変点上流の水面形を図-3から抜き出して示したものである。実験では定常状態の確保は困難で、非定常の水深の計測結果を不等流の計算結果と直接比較することはできないが、計測時間内の限られた時間での準定常と見なして、平均的な水深を読み取って図中に丸印で示している。勾配急変点上流の水深を比較する

また、勾配急変点下流の急勾配区間での計測結果は、計と、 $Q=2.8\text{m}^3/\text{s}$ では、実験値が若干低くなっている。算結果とほぼ一致していた。

(2) 河床の安定状況について

実験河川の河床安定性の状況が、水門直下流の捨て石河床部と空石張り河道で観測された。水門直下流に設置された10~15cm径の玉石は、貯水池水深1.5m、水門開度20~50cmの条件での通水により、表層30cm程度の玉石は水門から10m程度の区間でほとんど輸送され、その下流に堆積した。表層下には50~60cm径の玉石も設置されていたため、大きな洗掘は生じなかった。図-5は、水門からの流れを水平噴流とした時の掃流力の分布を齋藤の研究結果⁷⁾に基づいて示したものである。この図に基づいて水門開度 $bo = 30\text{cm}$ 、玉石径 $d = 15\text{cm}$ とすると、限界掃流力を越えるのは、およそ10m程度の区間となり、実験時の観測結果と一致していた。なお、洗掘深さは30cm程度であった。

河床勾配が1/15の急勾配区間では、水面の変動が大きいほぼ等流に近い流れが観測された。水面勾配を河床勾配に等しいとし、掃流力を $u_*^2 / sgd = 0.05$ として、水深 h と玉石の径 d の関係を求めると、玉石の径はほぼ $d = 0.8 \cdot h$ と表される。この関係を用いると、水深は20~30cm程度であったことから移動状態の石は16~24cm程度より小さい石となる。実験での観察によれば、20cm程度の石はごとごとと音を立てながら流下し、径40cm以上からなる空石張りの河床の玉石は安定していることが観察された。

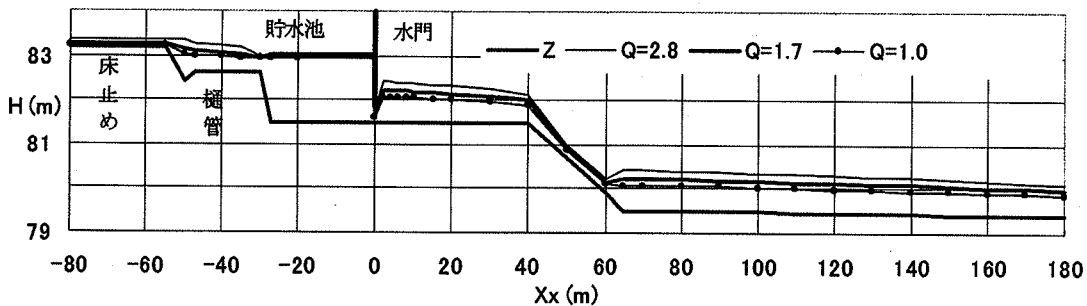


図-3 実験河川区間の不等流水面形

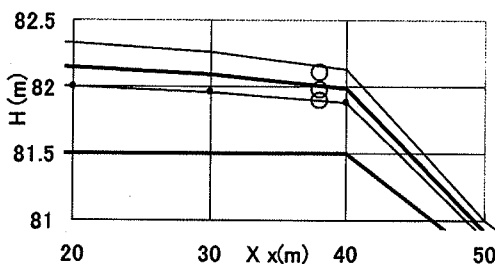


図-4 勾配急変点上流の水深評価

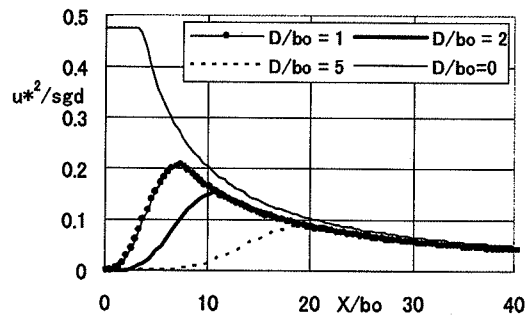


図-5 水門直下流の掃流力の評価

4. 不定流計算による粗度係数の評価

(1) 不定流計算方法

不定流の計算は種々の方法によりなされているが、ここでは2-step Lax-Wendroff 法とMike11と呼ばれる汎用的に開発されている中心差分6点式アボット法によって行う。以後、前者をLW法、後者を6Points法と略称する。基礎式は、次の連続の式と運動方程式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot \left(i - \frac{n^2 \cdot Q \cdot |Q|}{A^2 \cdot R^{4/3}} \right) \quad (2)$$

計算は、実験河川区間とその下流河道の計算に分けて行う。実験河川区間のA, B河道の合流地点では調整池として機能しているので、この区間に流入した洪水流は、堰越流による流出とし、連続の式を用いて下流河道への流出量を計算する。下流河道への流入量条件は、この堰越流による流出量を上流端条件とする。なお、合流地点への流量はLW法によって求める。

図-6は下流河道への流入量計算の概略を示したもので、A, B河道への流入量を基に合流地点のそれぞれの流量を求め、合計流量を堰越流として計算している。A河道の流量は、貯水池の水門を開放すると、樋門からの流入量は次第に貯水池に流入するようになり、最後にはA河道の流量は0となる。従って、A河道の流量は、初期流量から直線的に時間と共に減少するとして、合流点までの不定流計算を行う。

計算の時間間隔 Δt を1秒とし、LW法では流下方向の距離間隔 Δx を10mとし、6Points法では測量断面毎の100mとした。A河道は、側辺勾配1:2でほぼ底幅3mの台形断面水路である。B河道は、水門から70m区間では側辺勾配1:1で底幅2mの台形断面水路、それ以後では側辺勾配1:2で底幅2mの台形断面水路である。下流河道は、100m間隔の測量断面資料を基に、水深と断面積、水深と径深の関係を二次曲線近似して計算に組み入れた。また、測量断面の前後50m区間内では断面が一様であるとした。

下流河道の不定流の計算では、下流端を等流水深として不等流計算によって求められる水深を初期水深とする。下流河道の計算区間は、合流地点($X=8.25\text{km}$)から小野井堰($X=7.54\text{km}$)までの区間とする。小野井堰の上流河床面からの高さはほぼ0.6mで、下流面の高さは1.5mである。この井堰によって形成されている貯水区間からの流出は、堰越流によって規定される貯水池として、A, B河道の合流地点と同様に連続式によって計算する。

(2) ヨシの植生調査と粗度係数

ヨシの密生している図-2の②~③区間で、植生密度、植生長、茎径、引張り強さを調べた。植生密度 λ は、

茎の総断面積/単位面積とする。ヨシの根株は、平面的な直径が0.3~0.6m程度の大きさで、ほぼ0.5~2m間隔で密生している。平常時には、根株の間を縫うように水が流れている。一株の茎の本数は、10株の平均で110本、茎長さの平均は2.7mで、茎長さの1/3長さの茎径平均はほぼ1.0cmであった。根株を囲んだ場合と根株の中間とした場合では植生密度は異なるが、およそ0.004~0.008であった。写真-1、写真-2は、ヨシの密生状況を示したものである。引張り強さを調べると、196N(20kgf)で抜けたものは10本中2本で、残りは茎が切断された。杉尾ら⁹⁾によって示されているように、引抜よりも切断のほうが容易であることが認められた。植生と粗度係数との関係では、水深が植生高より低い場合についてはあまり明かにされていない。林ら⁹⁾は、全断面に植生が密生した状態を想定して、円柱群による実験を行って、密度による粗度係数を抗力増大と関係づけて示している。図-7はその結果を参考にして、河床面の粗度係数を0.04, 0.01として、植生密度 λ が0.0044, 0.008, 0.0153の場合を示したものである。図-7及び実験時の植生状況や流れの状況を考えると、水深が0.5~0.7m程度で植生長の1/4程度であること、ヨシが倒伏しない状態であること、密度が0.008程度であることから、調査対象河川の粗度係数は0.2程度になると考えられる。

(3) 実験河川区間の計算結果

図-8、図-9は水門開度を0.3mとし、2回連続開放した時の貯水池水深の計測値と計算結果、及び水門流出量の計算結果を示している。貯水池水深の時間的変化は、計測値とよく一致していて、貯水池への流入量、水門からの流

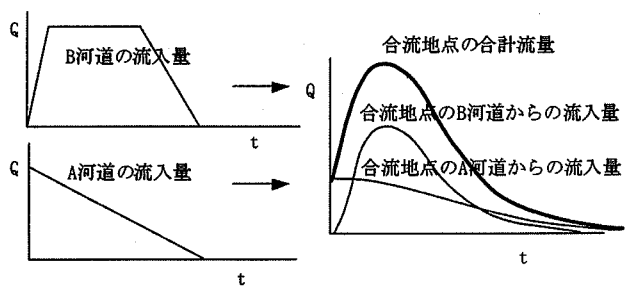


図-6 A河道, B河道, 下流河道の流量条件

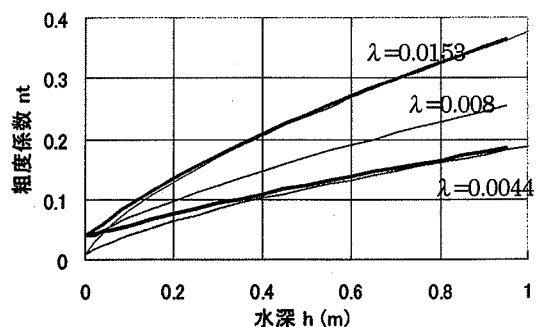


図-7 ヨシの密生する河道の粗度係数



写真-1 ヨシの密生した河道(X=7.8km付近)

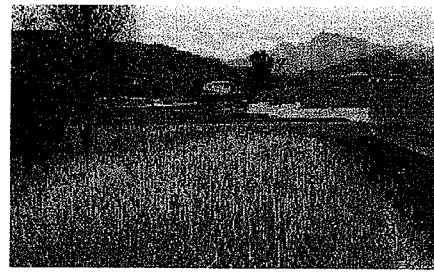


写真-2 ヨシの密生した河道(X=7.6km付近)

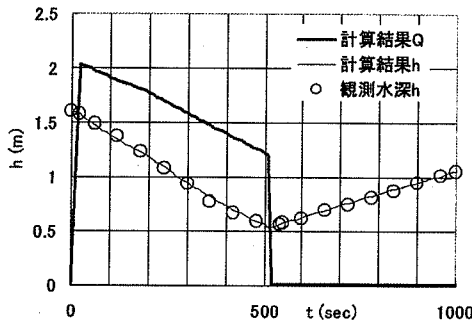


図-8 $Q=2\text{m}^3/\text{s}$ 通水時の貯水池の水位・流量関係

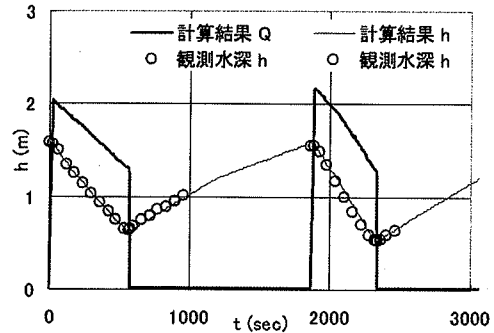


図-9 連続2回通水時の貯水池の水位・流量関係

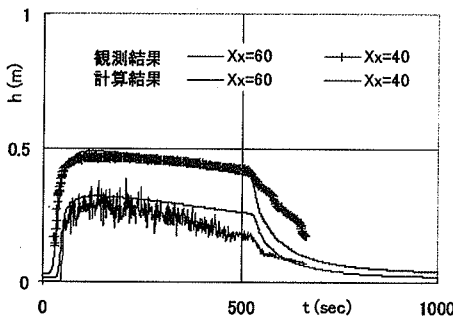


図-10 $Q=2\text{m}^3/\text{s}$ 通水時の実験河川の水深の時間的変化の比較

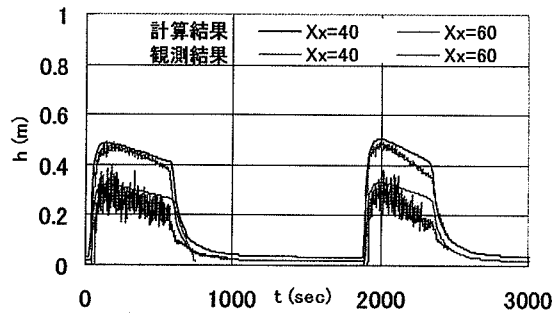


図-11 連続2回通水時の実験河川の水深の時間的変化の比較

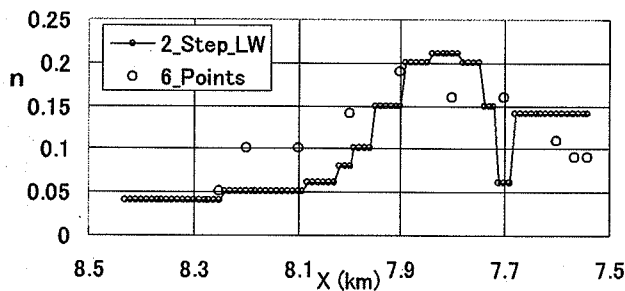


図-12 各地点の粗度係数

出量が適切に評価されたものとする。

図-10、図-11は図-8、図-9に対応する実験河川区間の水深の時間的変化を示したものである。Xxは水門地点を原点とした流下方向の距離を示していて、Xx=40mは勾配急変地点、Xx=60mは急勾配区間である。計算での粗度係数は、0.04としている。Xx=40mの水深は、ほぼ一致しているが、Xx=60mでは計算値がやや大きくなっている。

(4) 下流河道の計算結果

図-12は、下流河道の計算に使用した粗度係数の分布を示している。ヨシの密生度が、上流から下流に向けて次第に高くなり、X=7.8km地点付近からは次第に低くなり、X=7.7km付近の兎田橋下流では全くヨシが無くなり、転石だけの河道になること、また、その下流ではヨシが密生していることを考慮して、分布を定めたものである。最大の粗度係数は図-7を参考にして定めている。

図-13は、下流河道への洪水の伝播状況についてLW法による計算結果を観測値と比較したものである。図-14は、LW法及び6Points法の計算結果と観測値を比較している。X=7.54km地点の水深が高いのは、堰直前の水深を示したもので、越流水深に堰高0.6mを加えているためである。6Points法の計算結果でX=7.71km地点の水深が高くなっているが、距離間隔を100mとしたため、上下流の水位変化に対応させるため、粗度係数を大きく見積もったこと

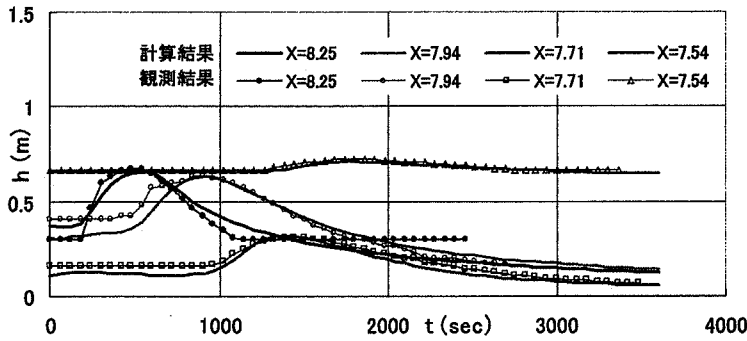


図-13 $Q \approx 2\text{m}^3/\text{s}$ 通水時の下流河道の水深の時間変化

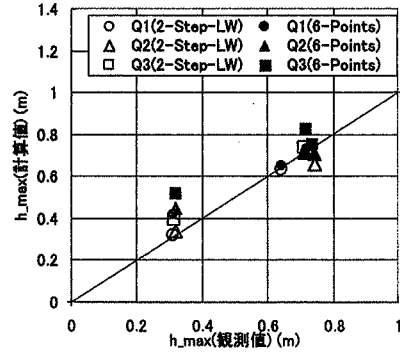


図-15 最大水深の比較

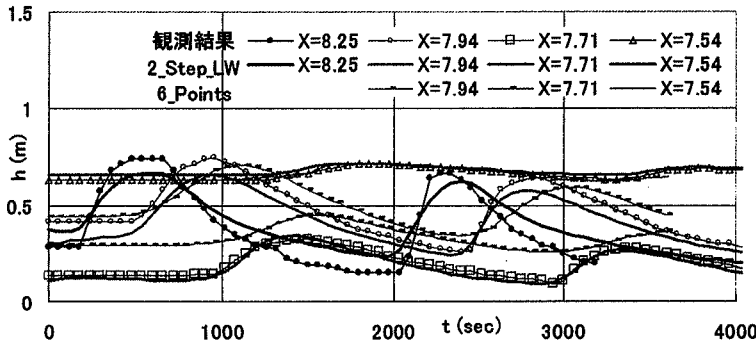


図-14 連続2回通水時の下流河道の水深の時間変化

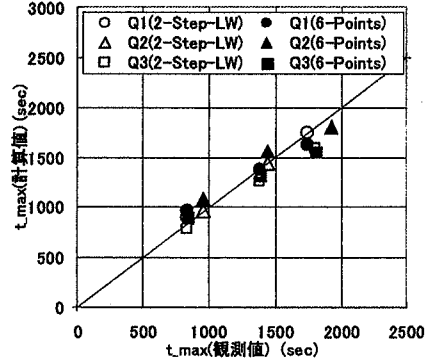


図-16 最大水深出現時刻の比較

によるものと考えられる。水位のピーク出現時刻は、どの条件の場合もほぼ一致している。ピークの水深が部分的に一致していない箇所も見られるが、ほぼ洪水位の時間変化を説明している、粗度係数が適切に評価されたものと考えられる。図-15、図-16は、最大出現水深と出現時刻について、LW法及び6Points法の計算結果を観測値と比較したものである。誤差はあるが、ほぼ観測値を説明していることが認められる。

5. おわりに

本研究は、実験河川の空石張り構造の河道やヨシが護岸天端まで密生した河道などの粗度係数の検討を、従来の粗度係数の研究結果を参考にして行った。また、堰の貯留機能を組み入れて河道の洪水減衰過程を検討した。実験河川は空石張り構造の河道で構成されているが、粗度係数、限界掃流力の検証では、一般的に知られていることと一致することが示された。実験河川下流の河道は、コンクリート水路や転石河道で構成されているが、ヨシが密生している河道では、水深が植生長の1/4程度であることと関係して、粗度係数が0.2程度になり洪水の減衰過程を説明できることなどが示された。終わりに本研究は西日本工業大学特別研究費の補助を得て進められたことを付記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 社)全国防災協会：美しい山河を守る災害復旧基本方針・解説版，社)全国防災協会，2001。
- 2) 板倉忠興，黒木幹男，森明巨：高水敷粗度に関する研究，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，1993。
- 3) 土屋十園，池田駿介：ヨシの植生帯のある複断面河道における水理，水工学論文集，Vol.42，1998。
- 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-45，1998。
- 5) 福岡捷二，島谷幸宏，田村浩敏，泊耕一，中山雅文，高瀬智，井内拓馬：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，河川技術論文集，Vol.9，2003。
- 6) 島谷幸宏，高瀬智，泊耕一，中山雅文，福岡捷二，田村浩敏，鶴田益平：ヨシ原現地通水実験結果の六角川河道計画への適用，河川技術論文集，Vol.9，2003。
- 7) 斎藤隆：水平噴流による洗掘に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.282，1978。
- 8) 杉尾哲，渡邊訓甫，田上篤志：植生の回復過程にある砂州での洪水による草本植生破壊の検討，水工学論文集，Vol.47，2003。
- 9) 林建二郎，藤井優宏，重村利幸：開水路中における円柱群に作用する流体力の実験，水工学論文集，Vol.45，2001。

(2004. 4. 7 受付)