

ヨシの植生帯のある複断面河道における水理

HYDRAULICS OF REEDS ZONE IN COMPOUND OPEN-CHANNEL FLOW

土屋十圀¹・池田駿介²

Mitsukuni TSUCHIYA, Syunsuke IKEDA

¹正会員 工博 東京都土木技術研究所 河川研究室長(〒136 東京都江東区新砂1-9-15)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

The present paper deals with hydraulics in compound open channels with vegetation, the purpose of which is the application of the experimental results to planning and design of actual rivers. The experimental study was performed by measuring the resistance to flow in channel with artificial reeds and lateral velocity distribution at various design discharges. The laboratory tests indicate that the resistance coefficient is increased considerably (by 53%) even if the vegetation locates only at low banks. As an experimental technique, it was found that fine nylon-filament was the best to simulate flexible vegetation.

Key Words : Artificial reeds, compound open-channel, river planing,
resistance coefficient, flexible vegetation

1. はじめに

近年、従来のコンクリート3面張りの河川工法から生き物の生息・成育環境、河川生態系に配慮した「多自然型の川づくり」が全国的に進められている。河川敷に樹木や植生を残し、動物の生息場所を保全したり、再生化を図ろうとする試みがなされている。

低水敷とその河岸に生える水草、ヨシ等の水生植物は魚類、鳥類などの棲む隠れ場所になったり、沈殿・堆積した物質中に含まれる窒素、磷などの栄養塩を吸収するなど環境保全機能、水質浄化機能を有していることで評価されている。

また、河川伝統工法にみられる柳枝工のような植生は流速を減少させるため、せん断力の増加を抑え、河道を侵食から守り安定化させる働きを有している点で再評価され、各地の河川で多用されてきた。しかし一方では、多自然型の川づくりにおける植生などの多用とその繁茂した河川敷は流水の抵抗を強め、洪水の流下能力を疎外する一面ももっている。

そのため従来、河川管理は草刈りをしたり、植生を1m以下にするなどの処置をとってきた。従って、植生を有する河道の整備や河川管理にあたっては洪

水時の河道の治水上の安全性、水理現象等を十分に把握しておく必要がある。

本報は河川計画上の問題点を把握するため、ヨシの植生帯のある複断面河道や低水敷に沈水植物が成育する河道の模型実験を行い、植生帯のある河道の粗度係数の推定、計画高水量、計画高水位および流速などについて検討を行ったものである。

2. 植生のモデル化

河道は野川上流部の複断面形状を有する箇所を対象として、図-1に示した河道諸元を設定した。河道幅員22.0m、深さ4.0m、河床勾配1/400、粗度係数0.03とした。また、本実験で対象としたのは流水でたわむ堅い植物であるヨシ等が高水敷に保全されている河道であり、流れにたなびく柔らかい草として低水路にはミクリを想定した。モデルに使用した植生は流水による変形特性の再現性が高い模型材料とするため池田らの既往の研究^{1) 2)}を検討するとともに、ヨシ、ススキ、オギの現地調査も行ない模型材料を選定した。

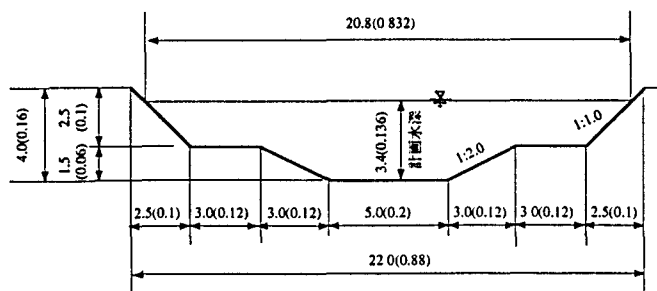


図-1 対象河道断面

()内模型値

(1) 既往の研究

河道の植生に関する水理的研究とその植生のモデル化の事例は、室田・福原³⁾のナイロンフィラメント、池田・金沢⁴⁾のナイロン、多田⁵⁾らの丸釘、中川・辻本⁶⁾らのポリエチレンと塩化ビニール、清水・辻本・中川⁷⁾のナイロン、竹ひごと塩化ビニール樹脂、室田ら⁸⁾の絹糸、日野・歌原⁹⁾のビニール帯が材料として上げられる。

これらの既往研究で検討された河道植生の性質を分類すると次のようになる。

- ① 背の高い竹などの直立性樹木
- ② 枝、葉が賑やかでこんもりした灌木
- ③ 葦などのように茎・葉とも直立であるが流れによって変形、振動、揺動するもの
- ④ 葉が扁平で流れになびくもの
- ⑤ 藻のように細長い沈水植物が河床附近でたなびくもの

これまでの研究では高水敷に多い植生で、剛性の高い樹木等を対象にした①②の研究事例が多い。福岡ら¹⁰⁾は植生の抵抗特性、死水域の設定法、合成粗度を含んだ不等流計算法について検討を行なっている。また、辻本らは開水路の横断方向流速分布をはじめとする水理を検討している。これらの研究では植生モデルは釘、竹ひごあるいはプラスチックなどの剛性の高い材料を用いている。既往の研究でナイロンフィラメントを用いた室田、池田らの実験は植生の剛性を考慮した点において高水敷の植生モデルを高さ5～6.8cm、1～4本/cm²にしているが、ほぼ妥当と考えられる。また、低水路の植生は再現性は縮尺だけとしてビニール帯、高さ5.6cm(140cmの模型縮尺)、密度1.56本/cm²、(1本の茎に7～8本の葉)を使用した。

(2) 植生の現地調査

対象とした野川の区間にはヨシ、オギ、ススキの群落が見られる。測定した諸元は植生の高さ、群生密度およびたわみ特性(剛性)である。高さの平均値はオギ2.94mで一番高く、次に、ヨシ2.83m、ススキ1.96mであった。また、密度はオギ77本/m²、ヨシ60

本/m²、ススキ40本/m²であり、模型縮尺1/25とすると順番にオギ4.8本/cm²、ヨシ3.75本/cm²、ススキ2.5本/cm²となる。以上、野川の現地調査箇所において植生群落として優先種であった植生はヨシであったことから、ヨシを代表的な植物とみなし、水理実験を行なうこととした。

(3) 植生のたわみ特性

水理実験で植生をモデル化するにあたって、洪水時にヨシ、オギ、ススキがどの位たわむか調べる必要がある。室田や池田の研究ではヤング率を指標にしている。そこで、流体力を受けるヨシ等の植生を片持張りと同様に考えるとたわみの式は次のようになる。

$$y_a = p l^3 / 3 E I \cdots (1)$$

ここで、 y_a : たわみ、 p : 荷重、 l : 載荷点までの距離、 E : ヤング率、 I : 断面2次モーメント

図-2に示すように対象植生をスタッフに固定し、高さ50cm100cmの2段階に分けて5本のサンプルのそれぞれの荷重とたわみを測定した。

以上の結果を平均すると、ヨシの曲げ剛性 $E I = 7.90 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ 、ススキは $E I = 3.75 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ 、オギの $E I = 1.79 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ である。実験の模型縮尺に合せると、ヨシの曲げ剛性 $E I = 8.09 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ 、ススキは $E I = 3.84 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ 、オギの $E I = 1.83 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ になる。そこで、ナイロンのヤング率(12,420Kg/cm²)を固定し、実験からえられた曲げ剛性に合せると、模型に使用する植生の直径 ϕ

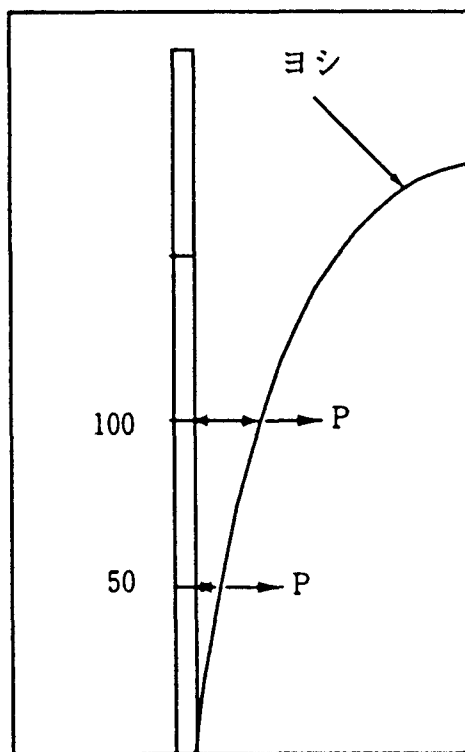


図-2 曲げ剛性測定試験方法

はヨシ $\phi=0.019\text{cm}$ 、ススキ $\phi=0.016\text{cm}$ 、オギ $\phi=0.023\text{cm}$ となる。池田は $\phi=0.0242\text{cm}$ のモデルで河床勾配1/200程度の水路において植生モデルの高さ約4cmで1cmたわむことを目安としている。今回求めたモデル植生の直径 ϕ は水路勾配1/400を考えると妥当な値と言える。池田の使用した $\phi=0.0242\text{cm}$ 程度のナイロンを使用することとした。

なお、植生の葉の抵抗に関しては福岡ら¹¹⁾の竹の葉による検討から見かけ上、葉によって透過性が悪く見える場合においても実際に抵抗に寄与する分は枝の寄与分比べて小さく、樹木の全抵抗は枝を中心に考えればよいので葉の抵抗は本実験でも無視することとした。

ミクリについてはオギ等に比べ流水抵抗が小さい植生であり、剛性を無視し得るものとして取扱い、カセットの磁気テープをモデルとして使用した。以上、植生モデルの選定に関する検討結果を表-1に示した。

表-1 植生モデルの諸元

高水敷	材料	ナイロンモノフィラメント($\phi=0.0242\text{mm}$)
	密度	3.75本/ cm^2 、約5mm間隔
	長さ	約11cm(2.80m(ヨシ)の模型縮尺)
低水路	材料	オーディオテープ(幅3.0mm)
	密度	1.56本/ cm^2 、約8mm間隔
	長さ	約5.5cm(1.4の模型縮尺)

3. 水理模型実験

(1)相似律と模型縮尺

物理量の相似性は慣性力、重力、粘性力を一致させる必要があるが、このうち支配要因となる慣性力、重力の比であるフルードの相似性のみ扱い、レイノルズ則は無視することとした。本実験では測定精度、模型範囲、実験設備の規模等を考慮し、長さの縮尺を $KL=1/25$ とした。

(2)実験施設

模型は木製架台の上にラワン合板を主とした木製ステージを制作し、その上に河道形状を再現した。模型上流側には給水設備として、整流板付き給水槽および流量調節バルブを設け、模型下流側には水位調節装置および排水設備を設置した。また、河道の模型延長は実験の精度、効率等を考慮し、河道幅の20倍程度とした。

(3)計測手法

水位測定を行ったポイントゲージの読みの精度は1/10mmとした。また、植生帯の天端標高は1mm読みのスケールとした。河川流量は給水管に内設されて

いる電磁流量計を用いて測定した。河道内の流速は電磁流速計、サーマル微流速計、トレーサー法などを用いて計測した。

(4)植生の範囲の設定

実験水路の植生範囲のうち測定に必要な区間と助走区間は流れの安定性のため植生範囲の10から15倍程度は助走区間をとる必要がある。本実験では上流側から5.0mは整流区間とし、下流側は低下背水等の影響を考慮し、同様に5.0mとした。従って、模型の縦断方向の植生範囲は20mとし、計測区間は上流、下流から各5mの地点の計10m相当とした。横断的にはヨシの植生範囲を低水護岸部と高水敷部とし、ミクリに関しては低水路部のみとした。

(5)実験条件

実験ケースは、①河道に植生のない状態、②高水敷・低水敷護岸とも植生のある状態、③低水敷護岸のみ植生がある状態、④低水河床にミクリがある場合の計4条件とした。植生条件、流量条件、水位条件を表-2に示した。

表-2 実験条件

Case No.	植生条件			流量条件 (m^3/s)	水位条件 (m)
	低水路床	低水護岸	高水敷		
植生なし	1-1				3.40 (計画高水位)
	2			130	3.20
	3				2.60 (限界水深)
	4				2.00
	5			20	1.50
	6				1.25
	7			70	3.40 (計画高水位)
	8				2.50
	9			50	3.40 (計画高水位)
	10				2.50
	11			40	3.40 (計画高水位)
	12				2.50
高水敷+低水護岸	2-1				60 4.00 (堤防満杯水位)
	2				50 3.80
	3				40 3.40 (計画高水位)
	4				30 2.92
	5				20 2.15
	6				13 1.50 (低水路満位)
	7				10 1.12
	8				5 0.68
低水護岸	3-1				95 4.00 (堤防満杯水位)
	2				60 3.40 (計画高水位)
	3				40 3.00
	4				20 2.10
低水路床	4-1				140 3.40 (計画高水位)
	2				60 2.23
	3				23 1.50 (低水路満位)
	4				10 1.08

4. 水理的検討

(1)粗度係数

本実験では、植生が繁茂した場合の粗度係数を検討するためには、まず植生のない状態の水路の粗度係数を把握し、基礎データを得る必要がある。実験条件において流れがほぼ等流になるように下流端の堰高を調整し、水位の縦断変化を測定した。実験ケース1から12を行い、実験値の水面形状と不等流計算から最も適合するように粗度係数を算出した。その結果、模型粗度係数 $n_m=0.0092$ 、実物換算粗度

係数 $n_p=0.016$ を得た。ほぼコンクリートの粗度係数と同じ値となった。

野川の実験対象区間の粗度係数 $n=0.03$ にあわせるためには模型水路に突起を張り付けたイボ粗度を用い、粗度調整をしなければならない。しかし、本実験においては植生の繁茂した状態との比較を行うことになるのでイボ粗度をもちいることが出来ない。そこで、河床がれきの野川を想定しているもののコンクリート三面張りに相当する粗度と植生がある場合の比較を行うこととした。

(2) 高水敷・低水護岸とも植生のある場合

流量条件は図-3に示したように $60\text{m}^3/\text{s} \sim 5\text{m}^3/\text{s}$ まで8ケースを設定した。このときの各流量に対応する粗度係数は表-3に示すとおりである。ここで通常の開水路流れと同じ扱いとしてマンギの平均流速式の逆算によって算定している。計画水深に相

Case No.	流量条件 (m^3/s)	備考	断面図
2-1	60	堤防満杯水深になる流量	
2	50	Case2-1とCase2-3の間の流量	
3	40	計画水深になる流量	
4	30	Case2-3とCase2-5の間の流量	
5	20	計画低水路満杯流量	
6	13	低水路満杯水深になる流量	
7	10	Case2-6から流量 $0\text{m}^3/\text{s}$ の間(1)	
8	5	Case2-6から流量 $0\text{m}^3/\text{s}$ の間(2)	

図-3 高水敷+低水護岸植生実験

表-3 粗度係数検討結果

Case	流量 (m^3/s)	n_p	n_n	植生あり／植生なし
2-1	60	0.098	0.0573	6.2
2	50	0.100	0.0589	6.4
3	40	0.097	0.0570	6.2
4	30	0.092	0.0540	5.9
5	20	0.067	0.0390	4.2
6	13	0.043	0.0254	2.8
7	10	0.035	0.0207	2.2
8	5	0.028	0.0163	1.8

当する場合の流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ では、粗度係数 0.097 、 $50\text{m}^3/\text{s}$ の場合、粗度係数 0.100 となり大きい値となっている。植生のある場合と無い場合(粗度係数 $n_p=0.016$)の比を同時に示した。コンクリート3面張り水路に対して5~6倍の粗度係数になっていることを示している。水深と流量の関係としてこれらの結果を図-4に示した。流量が $40\text{m}^3/\text{s}$ で計画水深に達し、

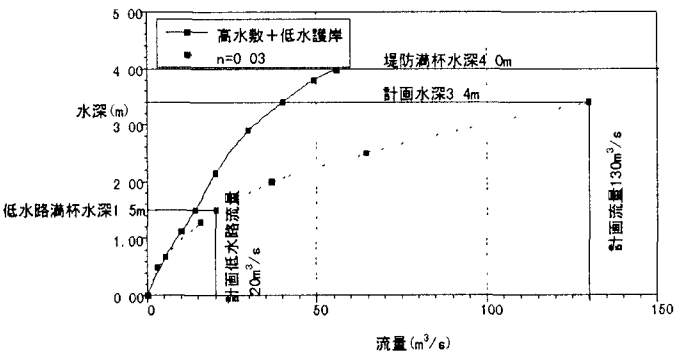


図-4 水深と流速の関係

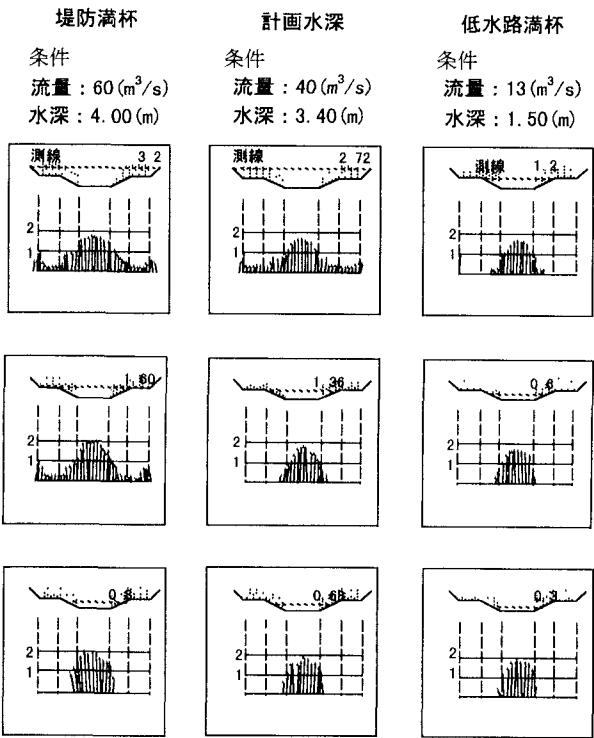


図-5 植生高水敷+低水護岸の流速分布

$60\text{m}^3/\text{s}$ で堤防満杯水深となる。また、流量が低水路満杯水深($13\text{m}^3/\text{s}$)以上、すなわち、高水敷に乗ると急激に粗度係数が高くなり疎通能力が低下することを意味している。しかし、現実には流量の増加とともに水位が上昇するが、植生は倒伏する場合が多いので $60\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量では粗度係数が少し減少する傾向にあるものと考えられる。

流速分布の状況に関して、堤防満杯水深になる流量 $60\text{m}^3/\text{s}$ 、計画水深になる流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ 、および低水

路満杯水深になる流量13m³/sについて測定した結果を図－5に示した。流量ごとに水深の2割、6割、8割に相当する流下方向の流速を最大値、最小値、平均値として示した。いずれの流量の場合においても8割水深が最も大きい流速を示している。また、ヨシ帯の中の流速は流心の最大流速(約2.0m/s)に対して1/5～1/7の流速(約0.3m/s)を示し、ヨシ帯が流水の抵抗体として作用していることが判る。そのことは逆にヨシ帯が浮遊物質等をトラップするフィルター効果をもっていることになる。

(3) 低水護岸のみ植生のある場合

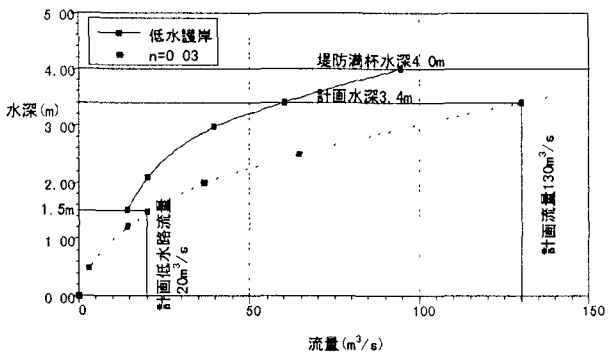
流量条件は図－6に示したように堤防満杯水深になる流量95m³/s、計画水深になる流量60m³/s、計画水深と低水路満杯水深になる中間の流量40m³/s、および低水路満杯水深になる流量20m³/sの4ケースを行った。このときの流量に対応した粗度係数を表－4に示した。また、水深と流量の関係を図－7に示

Case No.	流量条件 (m ³ /s)	備考	断面図
3-1	95	堤防満杯水深になる流量	
2	60	計画水深になる流量 (Case-2の堤防満杯流量)	
3	40	Case-2で計画水深になった流量	
4	20	計画低水路満杯流量	

図－6 低水護岸植生実験

表－4 粗度係数計算結果

Case	流量 (m ³ /s)	n _p	n _n	植生あり／植生なし
3-1	95	0.056	0.0330	3.6
2	60	0.063	0.0370	4.0
3	40	0.074	0.0432	4.7
4	20	0.064	0.0373	4.1

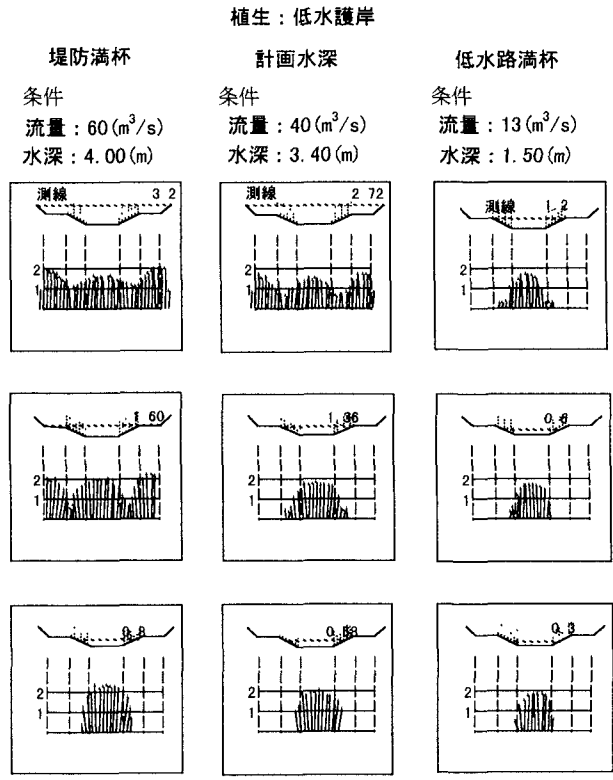


図－7 水深と流速の関係

した。流量40m³/sのときが最も粗度係数が高く、流量の増加とともに逆に粗度係数が小さくなる傾向にあった。流量95m³/sのケースで粗度係数np=0.056となっている。低水護岸のみ植生のある場合は高水敷の植生を除去したことによって計画水深時の流下能力が60m³/sとなり、高水敷まで植生のある場合に対して50%増の流量となっている。同様に堤防満杯水深になる流量に対しては約60%増となっていることが判った。

したがって、計画水深に対する計画流量130m³/sまでの疎通能力はないことは明らかである。しかし、この計画値は流域全体が市街地化し、流出係数0.8、降雨強度50mm/hのときの計画洪水流量であって、現実の市街地の流出係数は計画値までに至っていない。また、低水護岸にのみヨシの植生が500mの区間にわたって保全され、ヨシが倒伏しないことを前提にすれば、堤防満杯水深に相当する95m³/sが最大の流下能力となる。

次に、流速分布の状況を図－8に示した。前述した流速分布と同様、流量ごとに水深の2割、6割、8割に相当する流下方向の流速を最大値、最小値、平均値として示した。堤防満杯水深になる流量95m³/s、計画水深になる流量60m³/sの場合の流速プロファイル(2割、6割水深)をみると河道中心部、すなわち低水路より高水敷の方に最大流速が現れていることが判る。高水敷のヨシがとり除かれたことによ



図－8 植生・低水護岸の流速分布

て、洪水時は高水敷部分の河道断面負担が増加することになる。

(4)低水路のみ植生のある場合

流量条件は計画流量に近い140m³/s、60m³/s、低水路満杯流量23m³/sおよび10m³/sについて検討した。その結果、表－5に示すように粗度係数は計画粗度係数に近い値を得るとともに、ヨシに比べ粗度係数は小さく計画流量を充分満足することができることが判った。このケースについてはミクリという植物の物理的モデル化の再現生について大変困難な問題があり、今後、充分検討する必要があるため今後の検討課題とした。ここでは滑面河床とほぼ同様な流れを示していたため、流速分布については省略するものとした。

表－5 粗度係数計算結果

Case	流量 (m ³ /s)	n _p	n _n	植生あり／植生なし
4－1	140	0.022	0.0128	1.4
2	60	0.024	0.0139	1.5
3	23	0.026	0.0154	1.7
4	10	0.035	0.0203	2.2

5. まとめ

ヨシの植生帯のある複断面河道を対象に、再現性の高い水理模型実験を行い、植生帯のある河道の粗度係数の推定、計画高水位、計画高水量との関係において疎通能力の検討を行った。また、ヨシの植生のある複断面河道内の複雑な流速分布等の測定を行ない河道の水理的安定性について検討を行なった。模型実験上で植生条件を前提とした場合、本実験で得られた主要な結論は以下のとおりである。

①高水敷・低水護岸とも植生のある場合

計画水位、堤防満杯水位では計画高水量に対して少なくとも32%程度の流下能力となり、同様に低水路満杯水深では約65%の流下能力となる。粗度係数は前者がn=0.098、後者がn=0.043と極めて高くなる。

②低水護岸のみ植生のある場合

堤防満杯水位では計画高水量に対して少なくとも53%程度、計画高水位では約46%の流下能力となり、低水路満杯水位では同様に約65%の流下能力となる。

粗度係数はそれぞれn=0.056、n=0.063およびn=0.043と高い結果となつた。

③低水路のみ植生のある場合

粗度係数は計画粗度係数n=0.025に近い値を得るとともに、ヨシに比べ粗度係数は小さく計画高水量を充分満足することが判った。

参考文献

1)池田駿介、金沢稔(1994):可堯性を有する沈水性植物内外の流れおよび植生境界で発生する組織渦の3次元構造について、土木学会・水工学論文集、第38巻、345-350
2)池田駿介、空閑 健、陳飛勇(1996):両岸に植生帯を有する開水路流れに発生する大規模水平渦の安定性と運動量輸送、土木学会論文集、NO. 551/Ⅱ-37, 63-73
3)室田明(1984):直立性植物を有する開水路流れの構造について、土木学会、第28回水理講演会論文集、225-231
4)Ikeda, Kanazawa(1996):Three-Dimensional Organized Vortices Above Flexible Water Plants, Journal of Hydraulic Engineering, 634-635
5)多田博登(1994):側岸に植生のある開水路流れにおける横方向流速分布、土木学会第49回年次講演会、362-363
6)中川博次、辻本哲郎、清水義彦(1990):植生を伴う開水路流れの構造に関する研究、土木学会・水工学論文集、第34巻、475-480
7)清水義彦、辻本哲郎、中川博次(1991):直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 438/Ⅱ-17, 31-40
8)室田明ら(1983):水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究、土木学会論文集、97-103
9)日野幹雄ら(1977):水草のある流れの水理学的研究、土木学会論文報告集、第266号、87-94
10)福岡捷二、藤田光一(1992):土木学会論文集、No. 447/Ⅱ-19, 17-24
11)福岡捷二、藤田光一(1990):洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、建設省土木研究所報告第180号、133-141

(1997. 9. 30受付)