

開水路流中のかん木の抵抗特性に関する研究

Studies on the Resistance characteristics of the Bushes in the Open Channel Flow

東京工業大学 工学部 正員 石川忠晴

東京工業大学 工学部 正員 田中昌宏

1. はじめに

写真1は利根川 137km付近の左岸堤防から河道内を撮影したものである。このように複断面河道の低水路河岸付近にはかん木群落がよく見られる。かん木の高さは4~5mであり、洪水時にはちょうど水面に達する程度の高さである。本研究では、このかん木の抵抗特性について検討を行った。

植生の水理学的特性については、室田、福原^{1),2)}によって系統的な研究が行なわれており、植生の揺動が乱流構造及び抵抗特性に重要な影響を及ぼすことが明らかとなっている。しかしながら、本研究で対象とするかん木の様な大規模な植生の水理学的特性についてはほとんど調べられていない。さらに、著者らが特にかん木に注目したのは次の様な理由による。洪水時、低水路と高水敷の境界付近で激しい側方混合が生じることが知られているが^{3),4)}、写真1にみられる様に、かん木群落はちょうどこの混合領域の中に存在していることになる。したがって、かん木はそれ自体水面に達する程度の大規模な粗度であるばかりでなく、その揺動に伴って流体を混合させ、河道の抵抗を増大させる可能性がある。

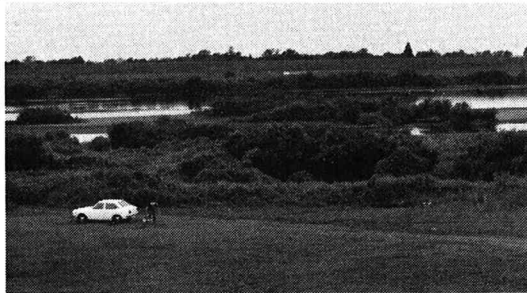


写真1 かん木の様子(利根川 137km付近)

そこで、本研究では、低水路河岸付近に生えるかん木群落の抵抗特性について、現地調査と水理実験によって検討した。現地調査においては、かん木の特性を詳細に調べ、さらに、その結果から洪水でかん木が揺動しうる程度にたわみえるかどうかを評価・検討した。水理実験では、かん木の模型実験を行い、かん木が揺動した場合の水理現象について検討した。

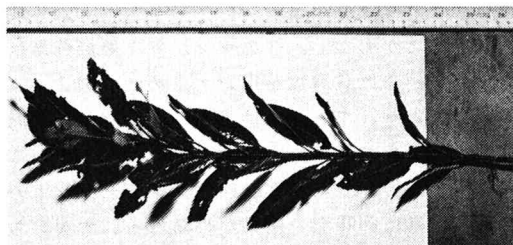


写真2 かん木の小枝

2. かん木の特性及びたわみの推定

まず、実際にかん木が洪水中で揺動しているかどうか確かめる必要がある。しかし、洪水中でこのことを確かめることは極めて困難であるので、次の様に考えることにする。まず、かん木が洪水中でどの程度たわみえるかを推定し、十分たわみえるようであれば揺動していると考え。このことは暴風時陸上において、樹木が激しく揺れていることから推測すれば十分妥当な考え方と言える。そこで、現地調査と室内実験によってかん木の特性を調べた。調査項目は、①かん木の構造、②かん木の流水抵抗、③ヤング率、終局強度である。①に関しては、現地の代表的なかん木一本について、枝の太さ、長さ、そのつながり方、葉の枚数等を詳細に調べ、樹系図を作成した。かん木の種類は”ながばかわやなぎ”と呼ばれ、写真2に枝の一例を示す。②の流

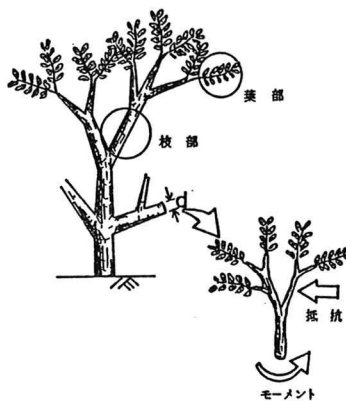


図1 かん木の構造

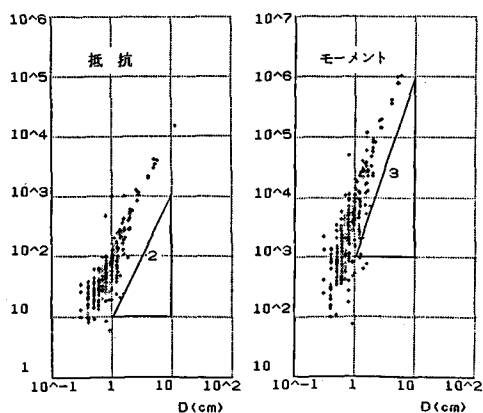


図2 直径と抵抗及び抵抗モーメントの関係

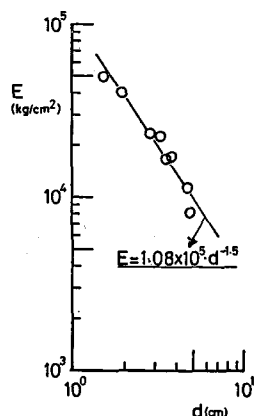


図3 ヤング率と直径の関係

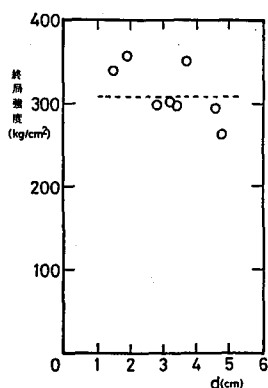


図4 終局強度と直径の関係

水抵抗は図1に示すように枝部と葉部を原単位とし、それらを積分することによって推定した。その際、枝部の抵抗は円柱と仮定し、葉部は開水路における後流の速度欠損量の測定から求めた。葉部の抵抗の評価方法は、同じ方法で球の抵抗を測定し、検証を行った。図2は①で作成した樹系図を基に、ある点で切ったときのそこでの直径とそれより上にかかる抵抗及び抵抗モーメントの関係を示している。これより、抵抗及び抵抗モーメントはそれぞれ直径の2乗、3乗に比例していることがわかる。③のヤング率と終局強度はアスファルト用曲げ試験機を用いて求めた。図3、4はその結果であり、ヤング率は直径に逆比例し、終局強度は直径によらずほぼ一定であることがわかる。この終局強度一定という結果と直径と抵抗モーメントの関係

から、非常に興味深い結果が得られる。すなわち、かん木が流水抵抗によって降伏する場合、全体がほぼ同時に降伏する。つまり、無駄のない合理的な構造になっているのである。

以上の結果から、洪水中のかん木のたわみを推定した結果が図5である。洪水写真より得られているかん木群中の流速が平均的に40cm/sであることから、かん木は相当たわんでいるものと推定される。したがって、洪水中ではかん木はかなり揺動しているものと推測される。

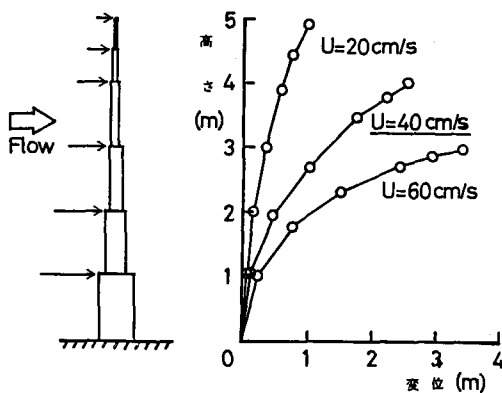


図5 かん木のたわみの推定結果

3. 水理実験

現地調査の結果から、かん木は洪水中でかなりたわんでいて、揺動する可能性が示された。水理実験では、かん木が揺動した場合どのような水理現象が生じるかを調べることを目的とする。

3-1 実験装置・かん木模型

実験は幅38cm、長さ8mの可変勾配水路を用い、底面は粒径約2mmの砂が一様に敷きつめられている。かん木の模型は、現象をできるだけ単純にするために、横方向にのみ自由度を持つ非常に揺れやすい構造にした。使用した模型はOHPシート製で図6に示したとおりである。この模型を水路中央に下流端から1～4mの区間に4cm間隔に一列に並べ実験を行った。

3-2 実験方法

実験は、まず、かん木模型が最も激しく、規則的に揺動するように流量、勾配を調節し、等流状態で観察を行った。模型の揺動に伴って、流体がどの様に混合するかを見るために、タフト、トレーサーを用いて水面を可視化し、写真及びビデオ撮影を行った。さらに、揺動現象の機構を探るために、プロベラ流速計による流速変動の測定及び波高計による水位変動の測定を行った。

3-3 実験結果及び考察

(1) 模型の揺動に伴う抵抗の評価

まず、かん木模型の揺動に伴ってどの程度抵抗が増大するか評価する必要がある。そこで、表1に示す3つのケースについて水位測定を行い、底面、模型及び模型の揺動に伴う抵抗の配分を概算した。この際、3つのケース共に流量 2.61/s、勾配 1/176 で一定とした。抵抗配分は勾配分割法によって計算し、抵抗則には次式で示されるマンニングの式を用いた。

$$V = \frac{1}{n} H^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

計算手順は以下の通りである。

①Run-3 の結果から底面粗度の n を見積もる。

$$n_b = H_b^{2/3} I^{1/2} / V_3 \quad (2)$$

ここに、 H : 水深、 I : 勾配、 v : 断面平均流速であり、 $()_b$: 底面、 $()_i$ ($i=1,2,3$) : 実験ケースを示している。

②Run-2 から模型の抵抗を見積もり、 n を逆算する。

$$\tau_t / \rho = (gH_2 I)_t - \left(\frac{V_2 n_b g^{1/2}}{H_2^{1/6}} \right)^2 \quad (3)$$

$$n_t = \sqrt{\tau_t / \rho} \frac{H_2^{1/6}}{V_2 g^{1/2}} \quad (4)$$

ここに、 τ : セン断力、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度を示し、 $()_t$: 模型、 $()_T$: 全体、つまり、Run-1 の結果に対応している。

③Run-1 から模型の揺動に伴う抵抗を見積もる。

$$\tau / \rho = (gH_1 I)_T - (gH I)_t - (gH I)_b \quad (5)$$

抵抗配分の結果は図7に示されている。これより、かん木模型の揺動に伴う抵抗の増大が顕著であることがわかる。

(2) かん木模型の揺動機構

Run-1 の場合、模型の列は波動的に揺動し、周期 1.4 秒、波長約 30cm であった。また、振幅 1mm 程度の水面の振動が観察された。模型の列は上流から 1m 流下してから揺動を始めており、一本だけ水路に置いた場合にはほとんど揺れを示さなかった。このことは、かん木模型の列の揺動現象が連成振動であること

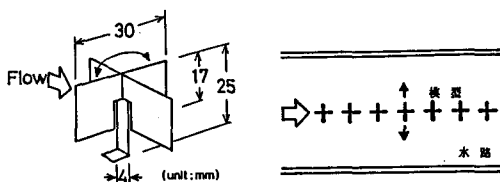


図6 かん木の模型

表1 実験ケース

実験番号	状 態	水深 (cm)
Run-1	模型が揺れる	3.0
Run-2	模型を固定	2.8
Run-3	模型なし (底面粗度のみ)	2.3

Run-1 の全体の抵抗		
底 面 40%	模 型 36%	揺 れ 24%

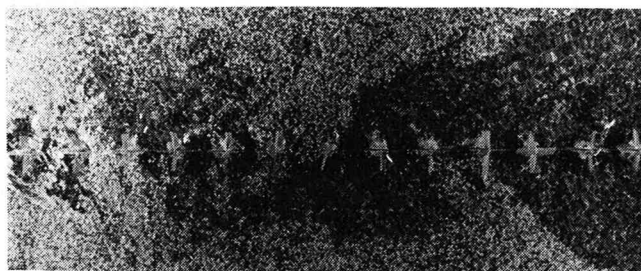
図7 抵抗の配分

を示している。写真3-(a)は水面に粉状のトレーサを入れたもので、黒い部分が遅く、白い部分が速くなっている。このような模型の揺動に伴う激しい流体混合によって先に述べた抵抗の増大が生じるものと考えられる。さらに、模型を固定した場合にも同様な観察を行ったところ、写真3(b)に示すように同様な混合現象が見られた。ただし、混合領域の範囲は揺動する場合に比べ狭くなっている。さらに、プロペラ流速計によって流速変動を測定した結果、変動の周期は模型を固定した場合としない場合共に揺動の周期に一致していることがわかった。そこで、模型の幅 b と振動周期 T 及び模型近傍の流速 U ($=14\text{cm/s}$) を用いてストローハル数、 $S = b/(U/T)$ を計算すると、0.15であった。これはT型物体の渦のストローハル数と一致している5)。したがって、模型の存在による混合

現象は、模型の列からの渦の放出によってその形態が決まり、さらに揺れることによって混合効果が助長されているものと考えられる。次に、表3に示すように水深と流速を変えて流速変動と水面変動の同時測定を行った。プロペラ流速計は水路中央から3cm、波高計は10cmの位置に並べてセットされている。流速、水位変動データ共に生データをそれぞれの標準偏差で無次元化した後、処理を行っている。CASE1～3のデータも比較を行うため、Run-1の標準偏差の値で無次元化している。表2に示すようにCASE1では模型の揺動は見られず、CASE2、3においては揺動が見られたものの、Run-1ほどの規則性は見られなかった。図8-(a)はRun-1のスペクトル解析結果であり、0.7Hzで両者共鋭いピークを示している。図8-(b)はCASE1のスペクトルであり、Run-1と同様に両者のピーク周波数は一致しているが、水面変動のスペクトルの値はかなり小さくなっている。CASE2、3も同様な傾向を示した。この原因は、表2に示すようにRun-1の場合には水路横断方向のセイシュの周期 ($T=2B/\sqrt{gH}$; B :水路の幅) と流速変動の周期がほぼ一致しており、そのため



(a) Run-1 (模型揺動)

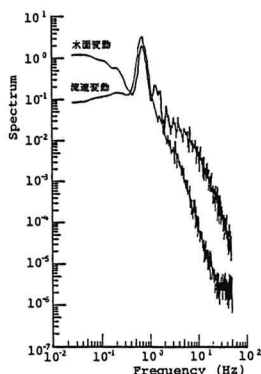


(b) Run-2 (模型固定)

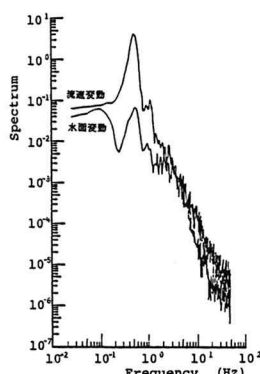
写真3 水面のトレーサの動き (流れは左から右)

表2 振動数の測定結果

	水深 (cm)	模型の振動周期 (S)	流速変動周期 (S)	セイシュの周期 (S)
Run-1	3.0	1.4	1.42	1.4
CASE1	2.5	揺れなし	2.00	1.5
CASE2	3.5	1.45	1.42	1.3
CASE3	4.5	1.25	1.42	1.2



(a) Run-1



(b) CASE1

図8 流速及び水位変動のスペクトル

に共振を起こしているためであると考えられる。

以上から、かん木模型の揺動現象は、模型の列の渦による連成振動によっており、その周期が水路横断方向のセイシュの周期に一致するとき共振を起こし、激しい混合運動を生じると考えられる。

4. 結 論

低水路河岸付近に生えるかん木群落の抵抗特性について、現地調査と水理実験によって検討し、興味深い結果が得られた。すなわち、

- ①洪水中的のかん木はかなりたわんでおり、かなり揺動しているものと推測される。
- ②水理実験では模型が揺れることによる付加的な抵抗が観測された。
- ③かん木模型の揺動現象は、模型の列の渦による連成振動によっており、その周期が水路横断方向のセイシュの周期に一致するとき共振を起こす。

水理実験の結果はそのまま現地の現象にあてはまらないが、現地においてもかん木の存在による抵抗及びその混合効果が重要であると推測される。したがって、複断面河道の抵抗特性を考える際、その断面形状による流れの抵抗特性に加えて、かん木等の植生の抵抗特性をも考慮する必要があると考えられる。

なお、本研究は昭和60年度文部省科学研究費の補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 室田 明・福原輝幸：柔軟な水草を有する流れの乱れ特性について、第27回水理講演会論文集、pp.585～590,1984.
- 2) 室田 明・福原輝幸：直立性植物を有する開水路流れの構造について、第28回水理講演会論文集、pp.225～231,1985.
- 3) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れにおける中規模渦の形成過程に関する研究、第29回水理講演会論文集、pp.833～838,1985.
- 4) 福岡捷二・浅野富夫・藤田光一・板野 章：複断面河道における洪水流の抵抗特性、第30回水理講演会論文集、pp.499～504,1986.
- 5) 岡内 功・伊藤 学・富田利雄：『耐風構造』,(株)丸 善、1977.