

ヨシ原で覆われた河岸の崩落機構と 護岸機能の評価

福岡捷二¹・仲本吉宏²・福田朝生³・石上鉄雄⁴

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 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 工修 九州旅客鉄道株式会社 (〒812-8566 福岡市博多区博多駅前 3-25-21)

³学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

⁴正会員 国土交通省中国地方整備局中国技術事務所 (〒736-0082 広島市安芸区船越南 2-8-1)

本研究では河岸保護機能があるとされるヨシ原で覆われた河岸を対象にヨシの地下茎の土壌保持効果に着目し、護岸効果の評価方法を検討した。まず、河岸下部で侵食が進行し不安定となったヒサシ形河岸の崩落について、原寸大の河岸を再現した実験の結果から河岸にヨシが繁茂している場合の限界ヒサシ長さおよびヨシの地下茎密度との関係を明らかにした。次に、ヒサシ状河岸より崩落したヨシを含む土塊の侵食に関して、ヨシの根の効果をもつヨシを含む土塊の侵食実験より明らかにしている。また、斐伊川水路のヨシ原河岸の観測結果と実験結果を比較し、ヒサシの崩落過程に関して崩落規模の予測が可能であることを示し、崩落土塊の流送過程に関しては一定の土質条件の下、ヨシの密度と土塊の流送の関係把握することができた。

Key Words : reed, bank protection, overhanging bank, tensile strength, erosion of soil mass

1. 序論

河川法の改正により、治水と環境の整備と保全を総合的に考える河川整備が行われるようになった。多自然型の河川整備は水際周辺の生態系を保全し、人々に憩いの場と川らしい景観を提供する。本研究で扱う自然河岸を活用した多自然型護岸が洪水流の侵食作用に対しどの程度耐えることができるかを把握しておくことは重要である。自然河岸が有する耐侵食性についてはこれまで様々な研究が蓄積されてきている。福岡ら^{1),2),3),4)}は粘着性土よりなる河岸の侵食機構を検討している。また、植生による護岸効果が生じる機構を明らかにしてきた⁵⁾。これらの河岸侵食の研究によって河岸後退の機構がかなりの程度明らかになってきている。その機構とは、次のように説明される(図-1)。まず、侵食抵抗の小さい砂層からなる河岸の下部が侵食され、河岸はヒサシ形状となる。不安定となったヒサシ状河岸はやがて崩落し、崩落した土塊はそこに崩落土塊がある限り、流速を減じ下流河岸の侵食を低減させる効果を持つ。しかし土塊は、徐々に流送されていき、それに伴って河岸は後退する。この機構は河岸の植生の有無に関わらず同じであると考えられるが、水際に繁茂しているヨシ等の地下茎を有する植物

が存在すれば、その土壌保持効果によって河岸後退の時間は遅れ、ある程度の護岸効果を期待することができる⁶⁾。河岸が後退する速度を見積もるためには、河岸が崩落する規模や、崩落したヨシを含む土塊が流送される速度を定量的に評価する必要がある。

本研究では、まず原寸大のヨシ原河岸を再現し、水位変動による河岸の崩落実験によってヨシ原が河岸のヒサシ形状を保持する効果を力学的に評価する。さらに、ヨシの根を含む土塊の流水による侵食実験を行い、土塊の侵食に抵抗する効果を有する土質とヨシの密度について検討している。実験より得られた知見を現地河川に適用することを狙いとして斐伊川堤外水路においてヨシ原河岸の侵食観測を行い、ヨシ原河岸の崩落規模や、崩落土塊が流送される速度を見積り、ヒサシの崩落過程と河岸の後退の関係、ヨシの密度と土塊の流送量との関係を把握している。

2. ヨシ原河岸の崩落実験

本章では、ヨシ原で覆われた河岸が侵食を受け、ヒサシ状を呈するとき、どの程度のヒサシ長さ(侵食深)まで

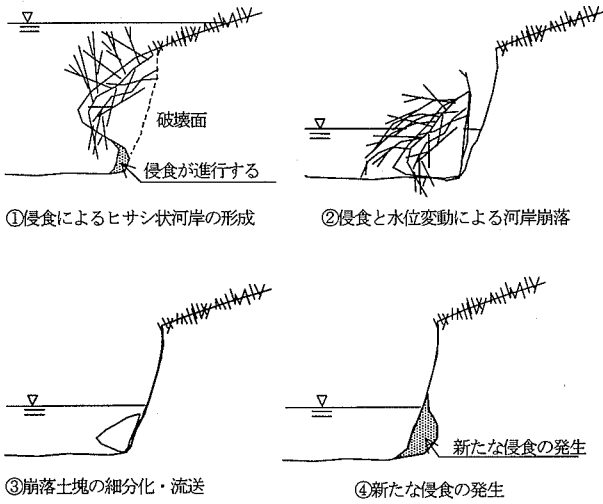


図-1 河岸の後退過程

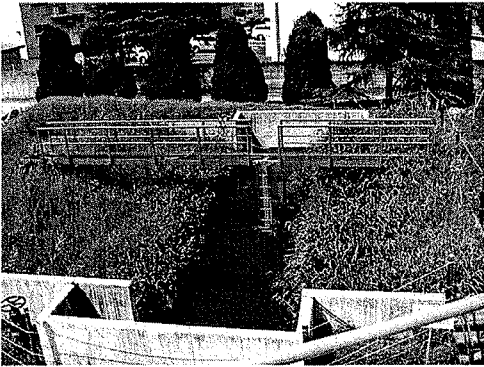
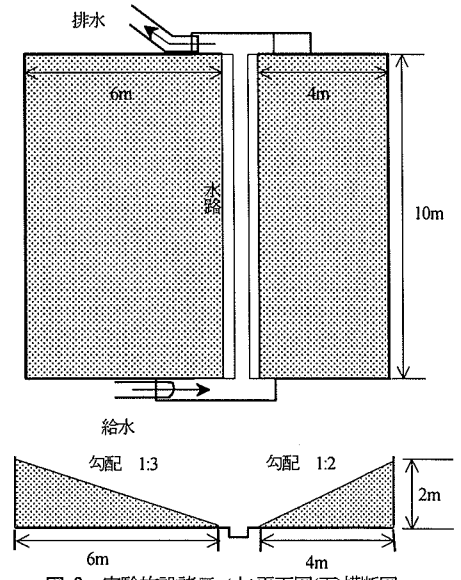
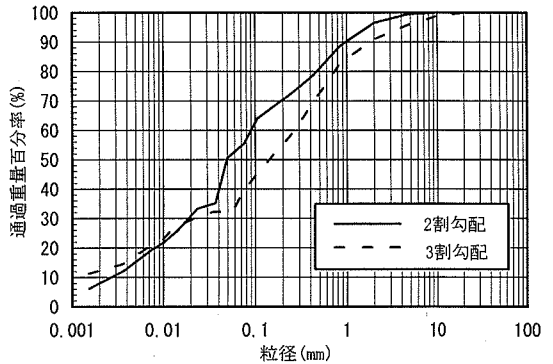


写真-1 実験施設



ヒサシ形状を維持できるかを力学的に検討し評価する。次に水位の変動による河岸崩落規模を実験的に検討する。

(1) 実験施設及び使用した試料

本実験は現地規模に相当するヨシ原河岸を作成し、河岸の崩落機構の検討を行った。写真-1に実験施設全体を、図-2に施設の諸元を示す。本実験施設は給水量と排水量を調節することで盛土内に水位の変動を発生させることができる。しかし、この施設では、洪水流に相当する大きな流れを起こすことはできないことから、洪水位の変動によるヨシ原河岸の崩落機構の解明が目的である。図-3は盛土作成に用いた芦田川高水敷の土の粒度分布であり、工学的にはシルト質砂に分類される。盛土の乾燥単位体積重量は 13.9kN/m^3 である。締め固めはバックホーのバケットで表面を叩いて行った。用いたヨシの地下茎は太田川高水敷上から採取したもので、養生期間は2001年3月から2001年9月までの6ヶ月間である。

(2) 実験方法

盛土に生育させたヨシの密度の範囲は $0\text{--}30\text{本/m}^2$ である。これは、一般的なヨシ原は 100本/m^2 程度であることを考慮すると小さい値である。しかし、ヨシ密度の小さい状態で行った実験より得られた結論は、ヨシ密度の大きいヨシ原河岸にも適用できることを4章で確認している。また、ヨシの地下茎の強度についても論文中で仮定したヨシの地下茎の強度を用いると現地と実験で現象をよく再現できることが確認されたため、実験施設のヨシ地下茎の強度は現地と同程度であると考えられる。実験手順は、図-4に示すとおり試験区域の土を取り除き、幅 B 、長さ L 、厚さ H のヒサシ状河岸を成形し、その形状を測定する(表-1、表-2)。その後、図-5に示すように、洪水による水位変動を想定したヒドログラフを与える。これは 0.01m/min の速度で上昇させ、水位が 1.6m に到達したら水位を維持し盛土内に水を十分浸透させる。その後、盛土内外で水位差が生じる程度の 0.005m/min の速度

表-1 実験結果(水位変動有り)

Case	B(m)	L(m)	H(m)	V(m ³)	γ (kN/m ³)	h_1 (m)	h_2 (m)	z(m)	N(本)	N/B(本/m)	s(m)	d(m)	T_r (N/本)
2-1	1.0	0.1	0.4	0.17	18.4	0.00	0.67	0.40	3	3	0.23	0.17	225
2-2	1.0	0.2	0.5	0.19	18.4	0.65	0.72	0.70	2	2	0.30	0.20	596
2-3	1.0	0.1	0.5	0.06	18.4	0.10	0.70	0.50	3	3	0.15	0.25	115
2-4	0.4	0.3	0.4	0.04	18.4	0.85	1.15	0.70	8	20	0.09	0.31	159
3-1	1.0	0.1	0.3	0.05	18.4	0.98	1.00	1.10	3	3	0.10	0.20	155

表-2 実験結果(水位変動無し)

Case	B(m)	L(m)	H(m)	V(m ³)	γ (kN/m ³)	N(本)	N/B(本/m)	s(m)	d(m)	T_r (N/本)
2-5	0.3	0.3	0.5	0.05	17.7	3	10	0.18	0.32	298
2-6	0.5	0.3	0.5	0.12	17.7	6	12	0.27	0.23	227

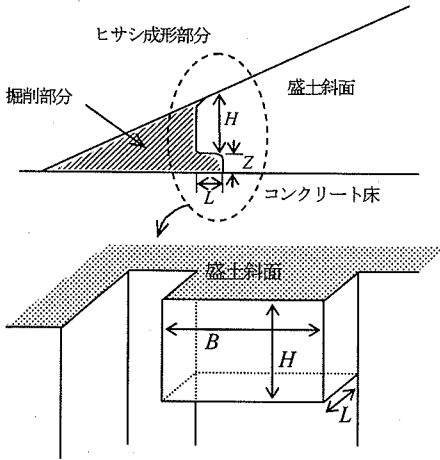


図-4 盛土斜面の掘削によるヒサシ状河岸の成形

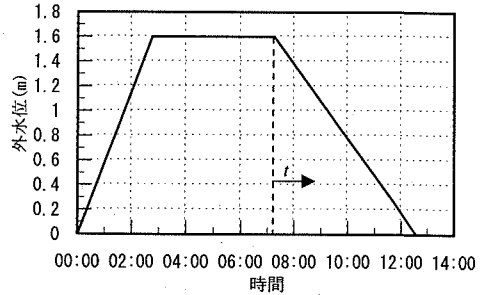


図-5 設定ハイドログラフ

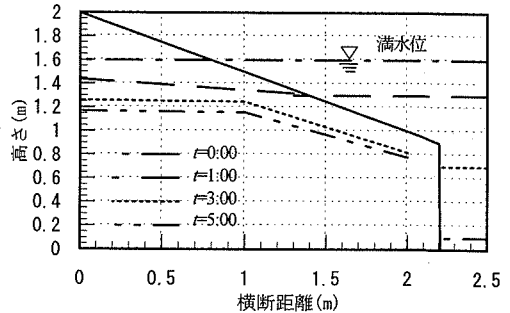


図-6 盛土内水位(t: 水位下降開始からの時間)

で降下させる。この水位変化は非現実的な水位の変化とならないこと、水位の降下時に盛土内外で水位差がつくことを条件に決定した。水位降下時には盛土内の地下水位の経時変化を測定する。地下水位は、一定間隔に穴を開けたパイプを盛土に鉛直に差し込み、その中の水位を計測することで求めた。水位降下中に成形した河岸が崩落した場合は、崩壊した断面の形状とヨシの地下茎分布を測定する。未崩落の場合はヒサシ長さを大きくし、再び水位を変動させ崩落が起こるまで同様の検討を行う。また、水位変動を与えずに単にヒサシ長さを大きくしていき、ヒサシを崩落させる実験も行った。

(3) 水位変動によるひび割れ発生機構の考察

図-6 は水位下降時の盛土内の浸潤線の経時変化を示す。ヒサシが崩落する時の状況を説明する。多くのケースにおいてヒサシは水位下降時に図-7 のように破壊面でひび割れを発生する。しかし、ヒサシはひび割れ発生と同時に崩落するのではなく、ある時間ヒサシ形状を保つ。その後さらに水位が下降すると、ヒサシは崩落する。

最初にヒサシにひび割れが発生する機構を考察する。洪水時の水位の上昇と共にヒサシには浮力が働き、ヒサシは水位が低いときに比べ崩落しにくい。しかし、水位

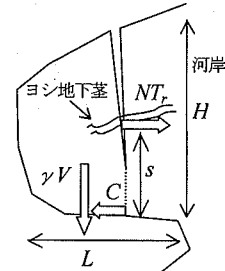


図-7 ひび割れの様子およびひび割れ時の力の釣り合い

下降時には次に示す3つの要素がヒサシの崩落に寄与する。1つ目は土が飽和することによる単位体積重量の増加。2つ目は浮力の減少。3つ目は図-8 に示すように盛土内と盛土外で水位の差が生じるためヒサシは水圧差により河道側へ力を受ける。これらの外力のヒサシ付け根を支点としたモーメントを考えると、河道へ転倒する方

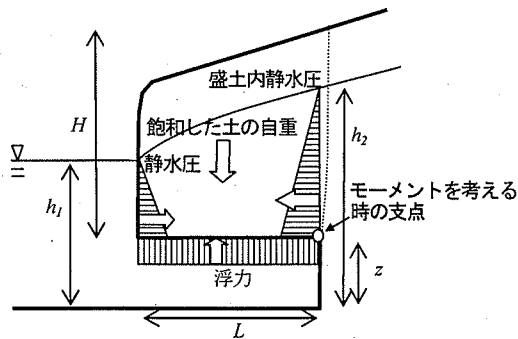


図-8 ひび割れ発生前に河岸ヒサシ部に作用する力

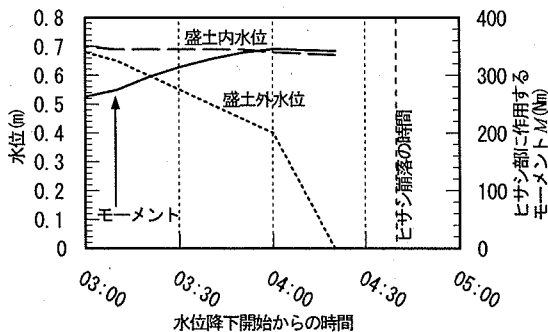


図-9 ヒサシ部に作用するモーメントの経時変化 (case2-1)

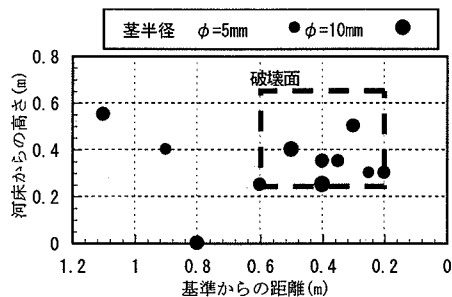


図-10 ヨシの地下茎分布(Case2-4)

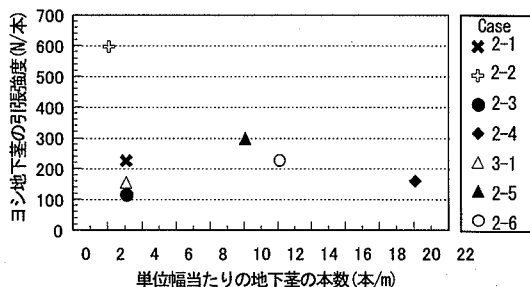


図-11 単位幅当たりの地下茎の本数とヨシの引張強度

向の外力となる。図-9 は case2-1 において下の式より導かれたヒサシ部に作用するモーメントの経時変化である。

$$M = M_p + M_b + M_w$$

$$M_p = B\gamma_w(h_2 - z)^3/6 - B\gamma_w(h_1 - z)^3/6$$

$$M_b = -B\gamma_w(h_1 - z)L^2/2, \quad M_w = V\gamma_{sat}L/2 \quad (1)$$

ここで M_p は盛土内外の水位差に起因するモーメントであり、水圧は静水圧を仮定した。 M_b は浮力のモーメント、 M_w はヒサシの自重のモーメントであり、ヒサシ部の重心はヒサシ長さの 1/2 の位置にあると考えた。 B はヒサシ幅、 V はヒサシ部の体積である。水の単位体積重量 γ_w には $1.0 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 、土の飽和単位体積重量 γ_{sat} には計測した値 $1.84 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ を用いた。その他の変数の説明は図-8 に示す。個々のヒサシの形状、崩落時の盛土内外の水位を表-1 に示す。図-9 に示すようにヒサシ部に働くモーメントの増加のため、ヒサシ上部では引張応力が作用し、土の引張強度を超えた場合にヒサシはひび割れを発生すると考えられる。しかし、実際にはヨシ地下茎が引張力を受け持つため、ひび割れが生じてもヒサシは崩落していない。そこで、ひび割れが発生しヒサシが崩落する限界の状態をモデルを用いて評価する。

(4) ヒサシの崩落を抑制するヨシの効果

図-7 はヒサシ部にひび割れが発生したときの釣り合

い関係を模式的に示したものである。図中の T_r はヨシの地下茎 1 本当たりの引張強度、 N は破壊面に存在するヨシ地下茎の本数である。 s はヒサシ部の下端からヨシ地下茎の平均的な位置までの距離、 V はヒサシの体積、 γ は単位体積重量、 C は土の圧縮力を示している。ヒサシ部を剛体とみなし、圧縮力はヒサシ下端部に集中していると考え。ヒサシ部の重心はヒサシ長さの 1/2 の位置にあると仮定する。ヒサシにはひび割れが発生しているため、河道側と破壊面での水圧差は無視できるものとする。図-10 は崩落後に見られた地下茎の分布とそのときの破壊面の一例を示す。ヒサシの付け根を支点としてモーメントの釣り合いを考えると T_r は式(2)で表現される関係を満足する。

$$NT_r s - \gamma V \frac{L}{2} = 0 \quad (2)$$

この式に水位変動有りとし無しの両方の実験結果を適用し T_r を算出した結果を表-1, 2 に示す。 γ には実験施設で計測した値を用い、水位変動有りの実験では飽和単位体積重量 $\gamma_{sat} = 1.84 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ を、水位変動無しの実験では湿润単位体積重量 $\gamma_r = 1.77 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ を用いた。図-11 に単位幅当たりの破壊面の地下茎の本数とヨシ地下茎 1 本の引張強度の関係を示す。ケース 2-2 は破壊面に存在するヨシ地下茎が少なかったため、計算上ヨシの地下茎の引張強度に土の引張強度を含んでしまい、大きな値を示したと考えられる。その他のケースでヨシ地下茎 1 本の引張強度は単位幅当たりの破壊面の地下茎の本数に関係な

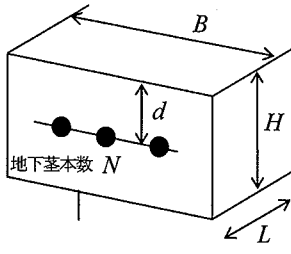


図-12 成形したヒサン状河岸の模式図

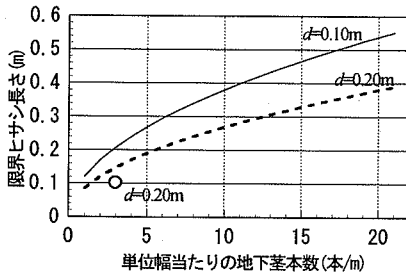


図-13 限界ヒサン長さ(H=0.3m)

く約200(N/本)付近の値となる。これは福岡ら⁹⁾が多摩川の高水敷において原位置試験器を用い、ヨシの引張強度を直接求めた200(N/本)と同様な結果を示している。これより、ひび割れの発生したヒサンの崩落は、土の引張強度には関係せず、ヨシ地下茎の引張強度のみが作用し、この大きさは式(2)で表現できる。

(5) 限界ヒサン長さの計算

これまで得られた結果を用いて限界ヒサン長さ L_c を計算する。式(2)を L について解き

$$L_c = \sqrt{\frac{2NT_r}{\gamma_{sat}BH}} (H-d) \quad (3)$$

の形に置き換える。式(3)の N はヨシの地下茎本数であり、ヒサン幅 B で割ることによって単位幅当たりの地下茎密度となる。また、 d は対象とする河岸に存在しているヨシ地下茎の平均深さである。図-12 は式(3)で用いられる諸元等を示している。式(3)から $H=0.3, 0.4, 0.5\text{m}$, $T_r=200(\text{N/本})$ を設定し、表-1, 2 の実験結果を併せて示したものが図-13~15 である。実験データはそれぞれ条件を合わせた曲線の付近に分布しており式(3)で限界ヒサン長さを概ね推定することが可能であると言える。

つぎに式(3)を使いやすい式形に変形する。式(3)は破壊面の地下茎の本数 $N(\text{本})$ を変数に含む。しかし、破壊が生じるまでは $N(\text{本})$ を計測することができず、限界ヒサン長さを求めることができない。そこで、単位幅当たりの破壊面にある地下茎の本数 $N/B(\text{本/m})$ が計測の可能な盛土面のヨシの密度 $M(\text{本/m}^2)$ と関係があると仮定して、単

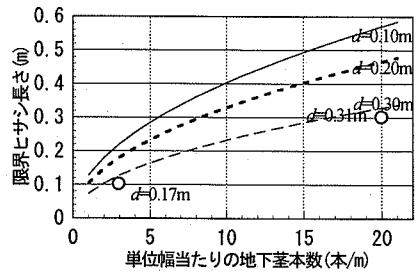


図-14 限界ヒサン長さ(H=0.4m)

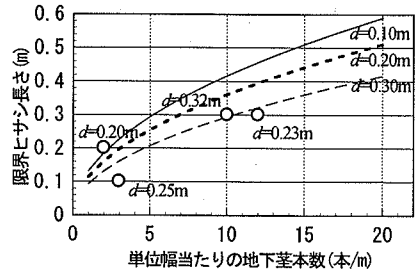


図-15 限界ヒサン長さ(H=0.5m)

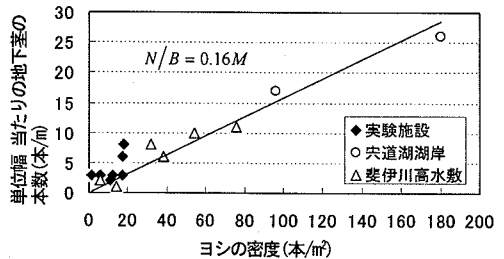


図-16 ヨシの密度と破壊面の単位幅当たりの地下茎の本数

位幅当たりの破壊面の地下茎の本数 N/B 本/m を求める。図-16 は、実験場所と宍道湖湖岸、斐伊川高水敷のヨシ原より得られた単位幅当たりの破壊面の地下茎の本数 N/B 本/m とヨシの密度 M 本/m² の関係を示す。なお、この調査において季節の影響は無視した。図より M と N/B の間にはほぼ比例関係があり、これを表現した式(4)が求まる。

$$\frac{N}{B} = 0.16M \quad (4)$$

つぎに地下茎の平均深さ $d(\text{m})$ はヨシ特有のほぼ一定の値をとると考えられる。本実験より得られた平均の地下茎深さは $d=0.25\text{m}$ である。したがってこれらの関係と $T_r=200$ (N/本) を代入して式(3)を変形すると式(5)となり限界ヒサン長さ $L_c(\text{m})$ は、ヒサン厚さ $H(\text{m})$ 、上面のヨシの密度 $M(\text{本/m}^2)$ 、飽和時の土の単位体積重量 $\gamma_{sat}(\text{N/m}^3)$ だけの関数となる。

$$L_c = \sqrt{\frac{64M}{\gamma_{sat}H}} (H-0.25) \quad (5)$$

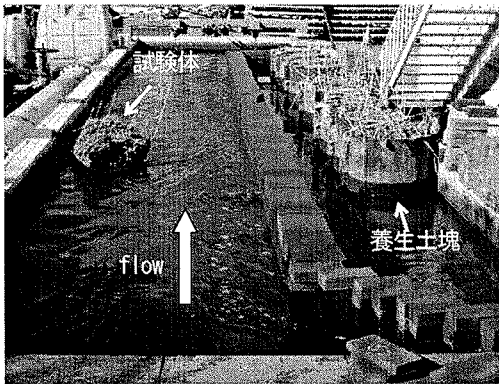


写真-2 実験風景

表-3 ヨシの密度

土塊番号	ヨシの密度 (本/m ²)
土塊1	0
土塊2	0
土塊3	90
土塊4	100
土塊5	130
土塊6	170
土塊7	400

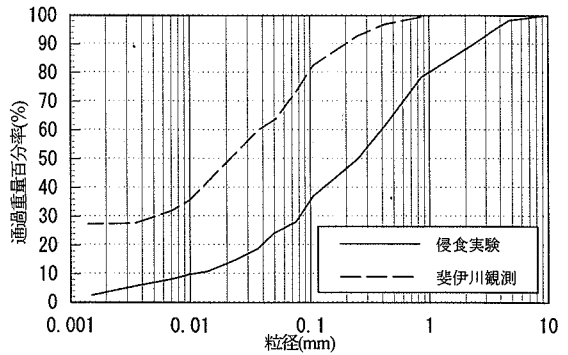


図-17 実験に用いた土塊と斐伊川用水路河岸の粒度分

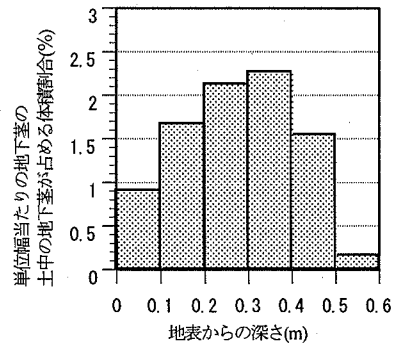


図-18 地下茎分布(ヨシ密度 260 本/m²)

3. 水中に崩落したヨシの根を含む土塊の侵食実験

本章では、河岸より崩落した水中の土塊が、ヨシの根を含むことによりどれだけ侵食速度が低下するのかを明らかにする。

(1) 実験方法

ここでは実現象で見られる崩落土塊と同程度の大きさのヨシの根を含んだ不攪乱の供試体を現地から採取してこれを流水中に置き、侵食実験を行った。供試体は直径 0.5m、高さ 0.6m の円柱型であり、ヨシの繁茂する太田川放水路の高水敷から採取し用いた。水路は水路長 10m、水路幅 0.8~1.4m、勾配 1/500 の開水路である。実験方法は、写真-2 に示すようにヨシの根を含む土塊を水路左岸壁に接触させるように設置し、通水する。現地ではさまざまな崩落の形態があるが、実験では土塊を自立させた。これは地下茎の割合と侵食量の関係を把握することを目的とするため、このような設置方法とした。時間の経過と共に土塊の形状を測定し、土塊周りの流速分布測定する。形状の測定は超音波式河床形状測定器を用いて鉛直方向に 5cm ごとに平面形状を測定した。土塊上面のヨシの本数(ヨシの密度(本/m²))が地下茎の量を代表していると考え侵食速度に対する指標とした。土塊は、全部で 7 体である。土塊中のヨシの密度を表-3 に示す。採取

表-4 実験ケース

ケース	土塊の番号	水路幅 (m)	水深 (m)	平均流速 (m/s)	通水時間 (h)
case1	3	1.05	0.19	0.36	3.1
case2	3	1.05	0.22	0.59	0.7
case3	4,7	1.05	0.29	0.51	2
case4	4,7	1.05	0.29	0.51	1.8
case5	4,7	1.05	0.31	0.51	1.4
case6	4,7	1.05	0.29	0.61	4.2
case7	4,7	1.05	0.29	0.94	1.3
case8	7	0.8	0.44	0.92	4
case9	7	0.8	0.41	0.99	3.8
case10	7	0.8	0.41	0.99	3.8
case11	6	1.4	0.24	0.61	48
case12	5	1.4	0.24	0.61	16

したヨシを含んだ土塊の平均のヨシの密度は 190 本/m² である。土塊を構成する土の粒度分布を図-17 に示す。土質は粘土含有率が 7% のシルト質砂である。図-18 に実験で使用した土塊の地下茎分布の代表としてヨシの密度 260 本/m² の土塊の土中の地下茎の占める体積の割合と地表からの深さの関係を示す。深さ 0.5m~0.6m の範囲で地下茎の占める割合が大きく減少しており、その範囲では侵食抵抗が小さいことが考えられる。実験ケースを表-4 に示す。

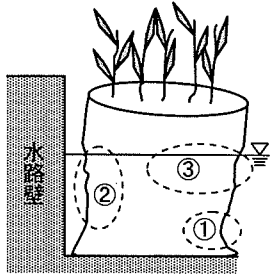


図-19 土塊の侵食位置(上流から見た図)

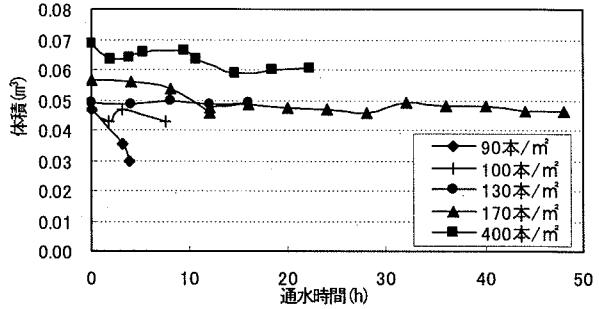


図-21 土塊の残存体積と通水時間の関係

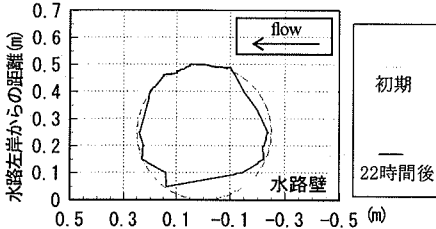


図-20 水面付近の土塊の形状
(土塊7, 水路床から高さ40cm)

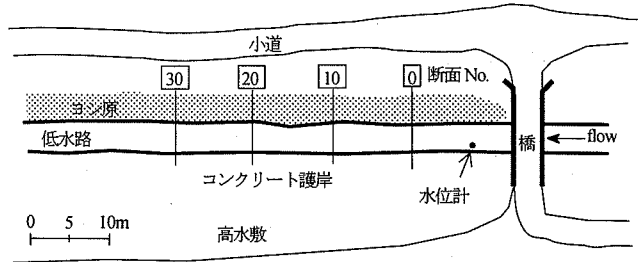


図-22 観測地点平面形図

(2) 土塊侵食の機構

ヨシ密度の小さい土塊から侵食・流送の状況を説明する。まず、ヨシがまったく生えていない2体の土塊のうち1体は自立する強度がなく設置時に崩壊し細分化した。もう1体も設置はできたが通水開始直後に崩壊し細分化した。このことは、用いた土塊を構成する土の侵食抵抗は、極めて小さいことを示す。ヨシ密度90本/m²の土塊3は通水から3時間40分後に崩壊し細分化した。100本/m²の土塊4は通水後1時間30分後に水路中央側に倒れたが、地下茎により土塊がその形状を保持し細分化することはない、円柱の形状を保っていた。130本/m²の土塊5は通水開始から16時間後に水路中央側に倒れたが細分化はしなかった。ヨシ密度170本/m²の土塊6は合計で48時間通水したが侵食はほとんど進まず、最後まで自立していた。400本/m²の土塊7も合計で22時間通水したがほとんど侵食されず、最後まで自立していた。これより、ヨシを十分に含む土塊は流水中でも長時間自立することが明らかとなった。

図-19は侵食位置の概略図を示す。図-20は、土塊7の水面付近の侵食状況を示す。侵食が顕著に進行する場所は大きく分けて三つある。第一は土塊下部の水路中央側、第二は水路壁と土塊の間、第三は水面付近の水路中央側のやや上流側である。土塊下部の水路中央側の侵食の進行により土塊は水路中央側に傾き、その結果水路壁と土塊の間で流れが集中し流速が増大する傾向が見られた。また、土塊下部は図-18で示したように地下茎が少ないために侵食が進行しやすい。

各実験ケースの土塊の侵食の時間経過を図-21に示す。

図を見ると90本/m²の土塊は急速に侵食を受け、体積が減少している事がわかる。また、最後まで自立していたヨシの密度が170本/m²と400本/m²の土塊は、初期の段階で多少侵食されるものの、ある程度時間が経過するとそれ以上侵食されないことがわかる。このようにヨシがない場合に流水により細分化するような土塊でもヨシを十分含むとほとんど侵食を受けないことがわかった。

4. ヨシ原河岸崩落の現地観測と実験結果の考察

つぎに現地観測の結果からヨシ原河岸の崩落規模と崩落土塊の流送速度について検討する。

(1) 観測場所及び河岸材料

図-22に斐伊川の用水路観測地点の平面形状を示す。右岸は盛土の天端で小道となっており、右岸盛土斜面にはヨシが繁茂している。その分布範囲は河道から斜面に沿って1~2mで密度は80~140本/m²である。左岸はコンクリートで護岸されている。図-23に水路横断形状の概略図を示す。河岸の高さは約1.7mで、ヨシの地下茎は地中深く、河床付近まで存在している。河岸を構成する土質は図-17に示すように粘土含有率が30%と細かい土で構成されており、工学的にはシルトまたは粘性土に分類される。

(2) 水位状況

図-24に観測期間中の水位変化を示す。観測は出水時

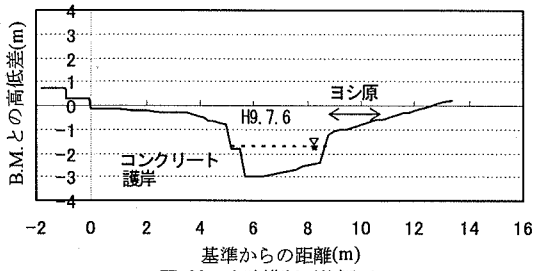


図-23 水路横断形状概要

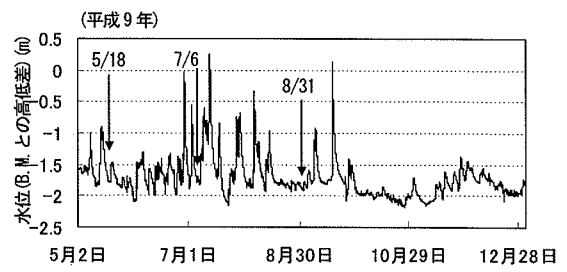


図-24 用水路の水位変化

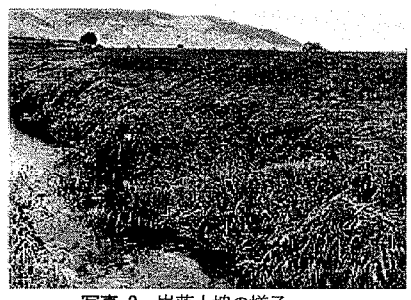


写真-3 崩落土塊の様子

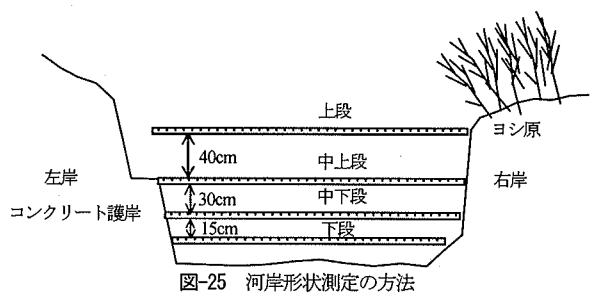
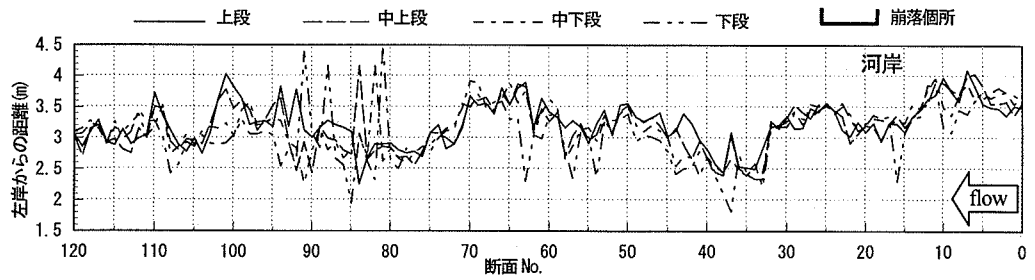
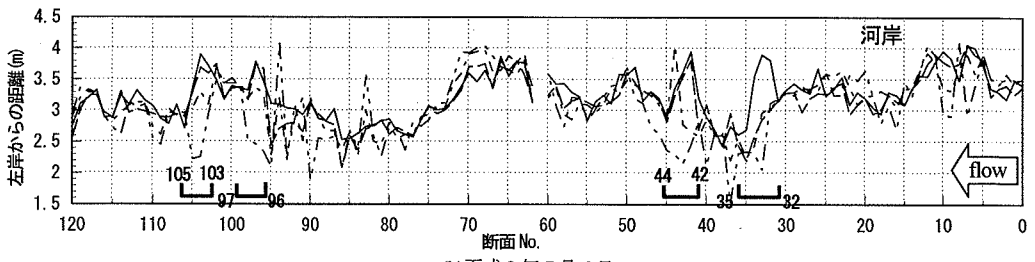


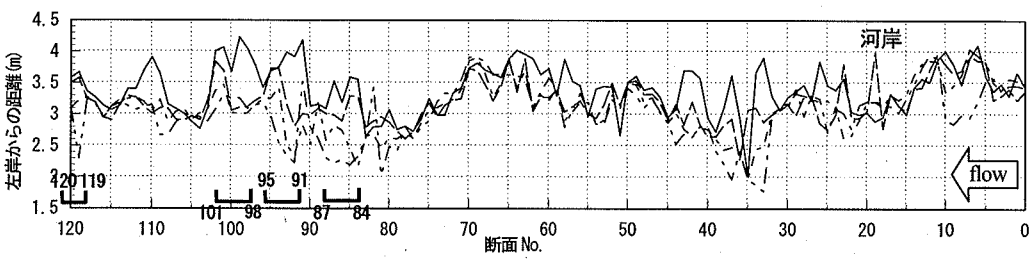
図-25 河岸形状測定の方法



(a)平成9年5月18日



(b)平成9年7月6日



(c)平成9年8月31日

図-26 河岸平面形状

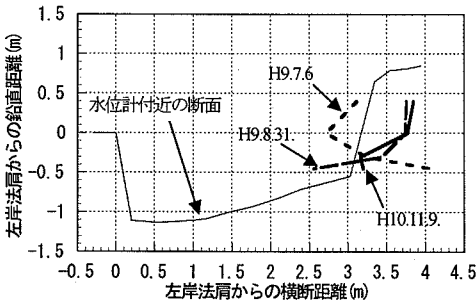


図-27 河岸横断形状の経時変化(断面94)
(H9.7.6→H9.8.31→H10.11.9)

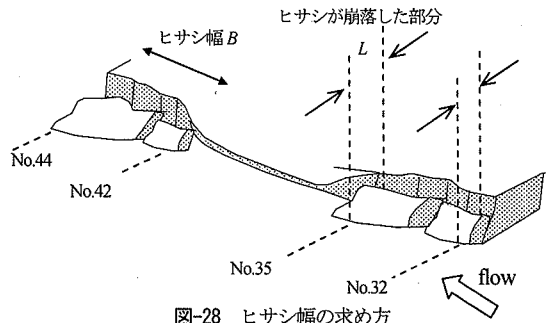


図-28 ヒサシ幅の求め方

表-5 ヒサシ幅と崩落土塊の流速速度

観測日	崩落区間 (断面No.)		ヒサシ幅 B(m)	ヒサシ厚さ H(m)	B/H	流速速度 $\Delta V/A/d(m/d)$
7月6日	32	35	4	0.50	8.0	1.1×10^{-3}
	42	44	3	0.34	8.8	7.7×10^{-4}
	96	97	2	0.63	3.2	1.5×10^{-3}
	103	105	3	0.63	4.8	5.5×10^{-4}
8月31日	84	87	4	0.54	7.5	1.6×10^{-3}
	91	95	5	0.78	6.5	7.3×10^{-4}
	98	101	4	0.68	5.9	5.0×10^{-5}
	119	120	2	0.55	3.6	6.6×10^{-4}

期を挟んで行っており、平成9年5月18日、7月6日、8月31日の間にかけて洪水による水位変動が起こっている。

(3) 河岸の崩落状況と形状変化

写真-3は河岸の崩落土塊の状況を示す。河岸形状の測定は縦断的に1m間隔で行った。図-25は河岸形状の測定方法の概要を示しており、左岸のコンクリート護岸からの距離を4段の高さで測定している。図-26は特に河岸の崩落が顕著であった(a)平成9年5月18日、(b)同年7月6日と(c)同年8月31日の河岸縦断形状である。河岸が崩落している場所には特徴がある。すなわち、断面0~30、50~80といった水路中央部から離れた流心から遠ざかる部分ではほとんど崩落が起こっていないのに対して、断面30~40付近と断面90~100付近といった水路中央部へ張り出した流心に近くなる部分で河岸の崩落が多く見られる。これより、ヨシ原河岸の縦断形状はヒサシの崩落により凹凸を呈するが、再び直線形へと遷移し、その過程が繰り返されていると考えられる。

図-27は河岸の横断形状の経時変化を示している。断面94の河岸が流路内に幅1mにわたって崩落し、その後、崩落土の下部が侵食・流送されている状況を見ることができる。

つぎに、崩落する土塊のヒサシ幅とヒサシ長さの関係を考察する。図-28に示すように図-26の河岸の縦・横断形状の経時データから、ヒサシとして張り出していた河岸が崩落した区間をヒサシ幅とした。また、ヒサシ厚さ

は崩落した区間の一つ前の時点で観測された形状より算出した。崩落土塊のヒサシ幅 B 、ヒサシ厚さ H を表-5に示す。福岡ら¹⁾によれば、崩落する土塊のヒサシ幅 B とヒサシ厚さ H の関係は $B/H=4$ (ヨシ無し)である。本水路においてもヒサシ幅とヒサシ厚さの比をとると $B/H=6.0$ となり、ヨシの無い河岸に比べて大きな値となった。このことは、ヨシの無い河岸に比べヨシ原河岸は地下茎の土壌保持効果により、大きな土塊が崩落すると考えられる。また、この効果はヨシ密度の縦断方向のパラツキの影響を受けるため、今後ヨシ密度のパラツキなども考慮した更なる検討が必要である。

(4) 観測結果と計算結果の比較

a) 崩落土塊の規模

ここでは、実験より導いたヒサシの限界の状態を示す式(5)と現地のデータを比較する。現地データに関してヨシの密度は各断面で計測していないため、平均的な現地の限界の形状を求め、その形状と式(5)を比較する。図-29は図-26に示す平成9年5月18日の河岸の横断形状データから河岸がヒサシとして張り出していたヒサシ長さ L を各横断面で求め、ヒサシの長さと存在数の分布を示したものである。図-30は同様にヒサシ厚さ H についてその大きさと存在数の分布を示したものである。図-29より、ヒサシの数はヒサシ長さが0.4mから0.5mの範囲で減少している。したがって限界ヒサシ長さは0.45m程度であると推定できる。図-30より、ヒサシ厚さの平均値は0.55mとなった。ここで式(5)を用いて計算した限界ヒ

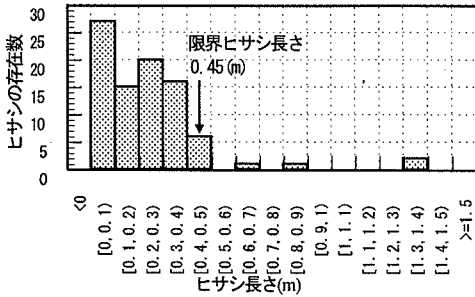


図-29 ヒサシ長さLの分布

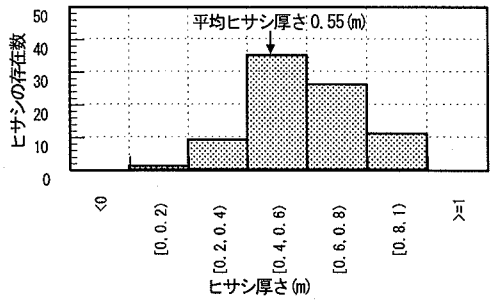


図-30 ヒサシ厚さHの分布

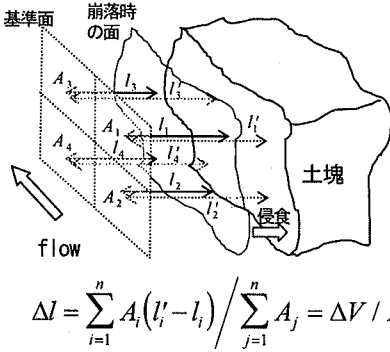


図-31 流送量の算出方法

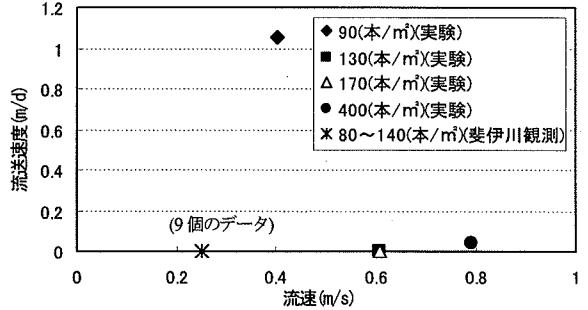


図-33 流速と流送速度の関係

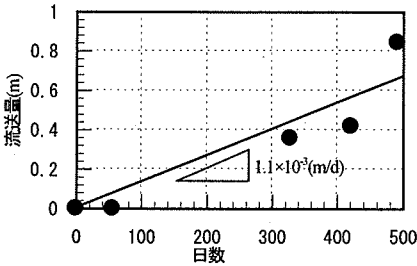


図-32 崩落土塊の流送量(断面32~35)

サシ長さと観測結果を比較する。用水路の地下茎は河床付近まで存在していたが、一般にヨシの地下茎はその大部分が地表から0.5m付近までに存在していることが知られている。そのため、式(5)の適応に当たり、実験で得られた地下茎の平均深さ $d=0.25\text{m}$ を用いることは問題ないと考えた。飽和時の土の単位体積重量 γ_{sat} に $1.8 \times 10^4 \text{N/m}^3$ 、ヒサシ厚さ H に 0.55m 、ヨシの密度 M に観測場所の平均の値として 110本/m^2 を式(5)に代入すると、限界ヒサシ長さ L_c は 0.46m となる。したがって、式(5)は、現地データとほぼ一致し、現地の崩落現象を良好に説明できることが確認された。

b) 崩落土塊の流送速度

河岸形状データより崩落土塊が流送される速度を見積もる。対象とする崩落土塊は表-5に示されている。図-27に示す崩落時に河道中央側に突き出していた土塊が

時間の経過とともに河岸下部が侵食される。この部分を流送された体積とする。しかし崩落土塊の縦断方向の長さはそれぞれ異なるため単純に流送された量を体積として算出した場合には値のバラツキが大きくなる。したがって流送量は図-31に示すように、空間に固定された基準面から土塊までの距離と崩落時の最河岸よりの面との距離の平均として定義した。この計算には図-26の河岸形状を測定したデータのうち、土塊侵食による変化がわかる中下段と下段の数値を用いた。図-32は断面32から35の区間で崩落していた土塊の流送量を日数経過に対しプロットしたもので、表-5は全ケースについて流送速度 (m/d) を算出しまとめたものである。その結果流送速度は $5.0 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-3} \text{(m/d)}$ と算出される。ここで、図-32に示すように比較的長い期間で平均化された流送速度は、概ね一定値と見ることが出来る。年スケールなどの長期的な問題を考える場合、大洪水や大渇水などを観測期間に含まない限り、流送速度は一定値になると考えてよい。ヨシの耐侵食性を評価する第一段階としては、流送速度一定を仮定し議論を進める。

実験結果と現地観測結果の流送速度を比較する。図-33は実験結果も含めて同様の方法で求めた流送速度と平均流速との関係でプロットしたものである。斐伊川の現地観測の結果は流速が 0.2m/s で流送速度が $1.0 \times 10^{-3} \text{m/d}$ 付近に9つの崩落土塊の結果が集中している。斐伊川の結果とヨシの密度が 90本/m^2 の侵食実験の結果を

比較すると、両者のヨシの密度、流速がほとんど同一であるにもかかわらず、斐伊川の流送速度は極端に小さくなっている。これは図-17 からわかるように実験で使った土塊の土質は斐伊川の土質と比べて粘土含有率が小さく、ヨシの根を含まない場合は斐伊川の土質より侵食抵抗が小さい。しかし、ヨシを十分含むと、0.8m/s の大きな流速に対しても、流送速度は小さいままであり、ヨシの根の耐侵食効果が大きいことがわかる。つぎに、斐伊川用水路の土塊の流送速度がヨシの密度の違いによらずほぼ同じであり、一方実験で得られた土塊の流送速度がばらついた原因を考えてみる。一般に粘性土の侵食は流速の小さいときは煙状溶出をし、流速が大きくなると塊状流出をすることが知られている⁷⁾。ヨシの根は土塊の剥離する面の引張り力を受け持つことにより塊状流出を抑えるものと考えられる。しかし煙状溶出に対しては、土の粒子が個々に溶出していくためヨシの根はこれを抑えることができないと考えられる。土塊の侵食実験では小さな塊状の剥離も時折見られたことから土塊のみの場合は塊状流出の状態と考えられ、斐伊川の土塊は流速が小さかったことから判断して煙状溶出の状態と考えられる。したがって流速と土質の関係がヨシの土壌保持効果の発現されやすい状態かどうかでヨシの密度の違いにより流送速度にばらつきが生じると考えられる。なお、ヨシの根を含まないと0.4m/sの流速で流送される粘土含有率が7%のシルト質砂の土塊は、ヨシの密度が170本/m²程度であれば0.6m/sという条件下でも土塊は長時間自立し、簡単には流送されないという結果を得た。

5. 結論

主要な結論を以下に示す。

- (1) ヨシ原河岸の崩落実験より、ヨシ地下茎のヒサシを繋ぎとめる効果を力学的に明らかにした。また、導出した限界ヒサシ長さを導く式(5)は、崩落する土塊を繋ぎとめるヨシの効果を表し、現地の観測結果と比較的良好な一致を示した。
- (2) ヨシの根を含む土塊の流送実験と現地観測から求め

た土塊の流送速度より、ヨシが土塊の流送に抵抗する土壌保持効果は十分期待できることが確認された。すなわち、ヨシが約170本/m²前後であれば、ヨシの根を含まないとすぐに流送される粘土含有率が7%程度のシルト質砂の土塊であっても平均流速が0.6m/s程度であれば、急速な侵食は受けないことが明らかとなった。

本研究ではヒサシ土塊の崩落、土塊流送の過程について研究し、崩落に関してはその規模をおおよそ推定できること、土塊の流送に関しては土塊の流送速度とヨシの密度の関係の目安を示すことができた。今後は土塊の土質、ヨシの密度、流速という3つの変数と土塊の流送速度の関係をより詳細に調べていく必要がある。

参考文献

- 1) 建設省荒川上流工事事務所, 東京工業大学土木教室福岡研究室: 河岸侵食・拉幅機構に関する研究, 94p, 1994.
- 2) 福岡捷二, 木暮陽一, 佐藤健二, 大東道郎: 自然堆積河岸の侵食過程, 水工学論文集, 第37巻, pp.643-648, 1993.
- 3) 福岡捷二, 渡邊明英, 小俣篤, 片山敏男, 島本重寿, 柏木幸則: 河岸侵食速度に及ぼす土質構造の影響, 水工学論文集, 第42巻, pp.1021-1026, 1998.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 片山敏男, 松屋英治, 柏木幸則, 山縣聡, 林基樹: 粘性土(シルト)河岸の流水による侵食拡大機構, 水工学論文集, 第43巻, pp.695-700, 1999.
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 新井田浩, 佐藤健二: オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp.59-68, 1994.
- 6) 福岡捷二, 渡邊明英, 柏木幸則, 山縣聡: ヨシで覆われた河岸の洪水流による侵食と流路の変動過程, 第4回河道の水利と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.83-88, 1998.
- 7) 関根正人, 熊谷利彦, 尾藤文人: 粘着性土の侵食機構に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.659-664, 1999.
- 8) 福岡捷二, 福田朝生, 永井慎也, 小谷哲也, 富田紀子: ヨシを用いた水際保護の研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.997-1002, 2003.

(2003. 3. 31 受付)

AN ASSESSMENT OF THE PROTECTION EFFECT OF REED AGAINST RIVER BANK EROSION

Shoji FUKUOKA, Yoshihiro NAKAMOTO, Tomoo FUKUDA and Tetsuo ISHIGAMI

This paper aims to assess the protection effect of riverbank covered with reeds from a physical viewpoint through field tests and laboratory experiments. A field observation is made on the erosion rate of reed covered levee of a channel for agricultural water use, and the fall of soil mass from the bank. A laboratory experiment was carried out to assess the erosion of soil masses including reed roots. The mechanism and volume of the fall of soil mass covered with reeds is investigated. From these investigations, it became possible to correlate the relationship among the erosion rate of soil masses, the density of reed and the kind of soils.