

投稿論文 (和文)
PAPERS

堤防芝の流水に対する侵食抵抗

福岡捷二*・渡辺和足**・柿沼孝治***

自然を生かした川づくりの最も重要な要素である堤防植生の侵食抵抗については、必ずしも十分に明らかにされていない。そこで、土質や芝の特性が異なる多摩川高水敷上の芝を持つ地表面で流水による侵食実験を行った。実験結果と解析により、芝の侵食抵抗を流れによる底面せん断力、侵食時間、土質の特性、芝の特性で表現できることを示し、芝の侵食限界の推定を行った。この推定方法の適性が、小貝川の洪水資料および常呂川水系無加川の堤防越流実験結果を用いて確認されている。

Key Words : grass covered levee, erosion resistance, shear stress, soil property, field test

1. 序 論

築堤後期間を経過した土で造られた堤防は雑草も含む野芝で覆われている。このような芝堤は裸堤よりもはるかに流水に対する侵食抵抗が大きいことが確認されているが、それがどの程度の侵食力に耐えるかについては未だ十分には明らかにされていない。このため堤防表面の芝の機能を堤防設計や管理の中に組み込む段階には至っていない。したがって、流水に対する芝の侵食抵抗を広い条件で検討し、定量化することが必要である。このことはまた、堤防の越流対策として芝を用いたアーマレビーや超過洪水対策としてのスーパー堤防の表面被覆構造を検討する上からも重要である。

流水に対する野芝の侵食抵抗を明らかにするには現地で行うことが大切である。堤体表面の植生は長い年月をかけて芝から雑草が混じった野芝に遷移したものであり、室内実験用に短期間で養成する張芝とは、被度¹⁾、根の張り方等が異なる。土質についても現地堤防の状況を室内で再現するのは難しく、土質特性が芝の生育特性に影響を与え、結果的に野芝の侵食特性を代表するものとなり得ない心配がある。そこで異なる土質、芝の特性を有する地表面上に通水し、侵食実験を行うことが重要となる。

野芝の侵食についての現地実験として、福岡、藤田^{2),3)}は現地用試験器を開発し、これを用いて江戸川の高水敷上で、芝を有する地表面の侵食実験を行った。その結果、平均侵食深 y (cm) と通水時間 t (min) との間に式 (1)

に示される関係が成立することを見出している。

$$y = A \log t + B \dots\dots\dots (1)$$

ここで A は芝面上の流速によって変化する値であり、 B はゼロと考えてよい値である。したがって、 A の大きさがその地点の侵食抵抗を代表している。実験では A が流速にほぼ比例すること、さらに限界侵食深 (芝が破壊するときの侵食深) が根の侵入深さに支配されること、芝の侵食限界流速は 2 m/s 程度であることが明らかにされた。しかし、この実験は 2 地点のみで行われた実験のため、 A の値が土質や芝の生育状況とどのような関係にあるかを考察するには至っていない。富田ら⁴⁾は、福岡らと同様に閉管路を用いて、芝の侵食抵抗の基礎実験を行っている。さらに渡良瀬川に試験護岸をつくり⁵⁾出水時の芝の侵食限界流速について調査し、福岡らと同様な結果を得ている。以上のことから芝の侵食抵抗、侵食限界について理解が深まってきたが、江戸川、渡良瀬川での結果をそのまま多様な土質、芝の生育状況を有する現地堤防に適用するには不安が残されている。また、近年の自然性が高く、環境のすぐれた河川づくりという観点からも芝張堤の価値は高く、その侵食抵抗について十分な理解が必要となっている。

本研究では、多摩川高水敷上に土質、芝の状態が異なる 3 地点を選び、江戸川での試験と同様な方法で芝の侵食実験を行い、底面せん断力、通水時間、土質、芝の生育状況と芝の侵食抵抗の関係を明らかにし、得られた結果を用いて芝堤の侵食限界の見積りを行う。さらに、流水に対する侵食抵抗と、雨水や外水の浸透に対する抵抗の大きい芝張堤防の構造について検討している。

2. 侵食実験

(1) 現地実験場所

実験は堤防法面ではなく、高水敷上で行われた。これは堤体を傷つけることが許されないからである。実験場所

* 正会員 Ph.D, 工博, 広島大学教授 工学部第 4 類 (建設系)

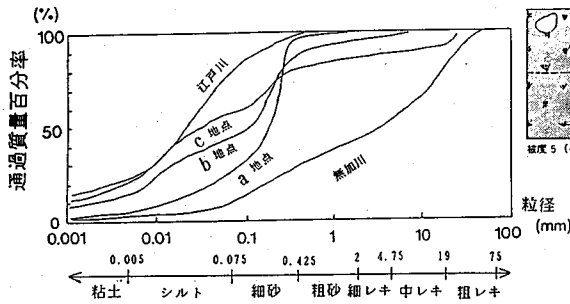
(〒724 東広島市鏡山 1-4-1)

** 正会員 建設省大臣官房政策企画官 (研究当時, 京浜工事事務所所長)

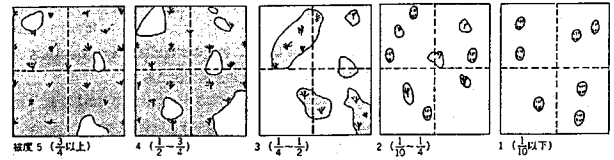
*** 正会員 北海道開発局石狩川開発建設部 (研究当時, 東京工業大学学生)

表一 実験場所の土質と野芝の生育状況

	粘土分 (%)	シルト分 (%)	砂分 (%)	レキ分 (%)	被度	根の侵入長さ (cm)	根毛層厚さ (cm)
a地点	6	23	71	0	5	30	5
b地点	16	30	50	4	3	20	5
c地点	21	38	28	13	4	15	5
江戸川	22	61	17	0	4	3	3



図一 実験場所の土質の粒径加積曲線



5. 被度が調査面積の3/4以上を占めているもの
 4. 被度が調査面積の1/2～3/4を占めているもの
 3. 被度が調査面積の1/4～1/2を占めているもの
 2. 個体数が極めて多いか、または少なくとも被度が1/10～1/4を占めているもの
 1. 個体数が多いが、被度が1/20以下、または被度が1/10以下で個体数が少ないもの
 - + 個体数も少なく被度も少ないもの
 - 7 極めてまれに最低被度で出現するもの
- (7 記号が省略されて、+記号にまごめられることも多い)

以上の内 5,4,3 は個体数は問題にしない。

図二 被度の模式図¹⁾

は以下の条件を満たす必要がある。

① 土質条件

芝の根が入っている堤体の表面の土質とほぼ同じであること。具体的には砂質土、シルト質土および粘性土である。レキ質土は侵食試験器の設置が難しいので、今回は除外している。

② 芝の条件

堤防の代表的な植種であること。同一場所で4ケースの試験を行うことができるほどの広さを持ち、そこでの芝の生育状況が、ほぼ均一、同一の植生、および土質特性からなる。

多摩川の河口1.6 kmの大師橋付近から河口54 kmの羽村堰付近までの全長約50 kmにわたって、左右岸の高水敷上について土質調査、植生調査、土地利用調査、資材搬入のアクセスの調査を行った。その結果、土質については、砂質土もしくは粘性土であり、植生についてはオニウシノケグサ、エノコログサなど多摩川堤防の代表的な植種がほぼ一様な密度で生えている六郷橋上流左岸高水敷上(6.0 km)が実験サイトとして最適と判断した。

この地点をさらに詳しく踏査し、a, b, cの3地点を実験場所に選定した。実験場所の土質、野芝の生育状況を表一に、土の粒径加積曲線を図一に示す。a地点の土質は他の地点の土質に比して砂が多いことがわかる。図一には、後の検討に用いる江戸川²⁾および無加川²⁾の粒径加積曲線も併せて示す。

表一中、被度とは調査区域内でそれぞれの植種が地表面を覆う割合であり、被度はブロンーブランケの全推定法を用いる。ブロンーブランケの全推定法は、植物が地表を覆う度合に、個体数を組み合わせたものであり、

図二に被度の模式図を示す¹⁾。根毛層とは地表付近で密生して絡み合う芝の細い根の層のことである。

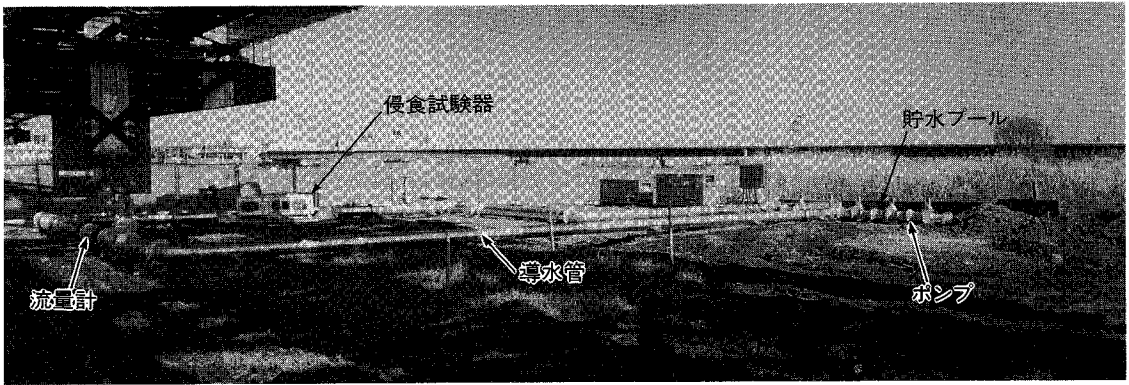
(2) 実験装置と実験方法

芝の侵食実験においては、実際の洪水に相当する流れの底面せん断力を実験装置内に発生させることができる必要がある。このために、高流速流れを確実に保証できる閉管路形式の実験装置を採用した。この実験装置は原理的に江戸川²⁾で用いた実験装置と同じものであるが、この実験結果を踏まえて装置を大型化し、測定範囲を広くとり、また種々の実験精度の向上がはかられている。

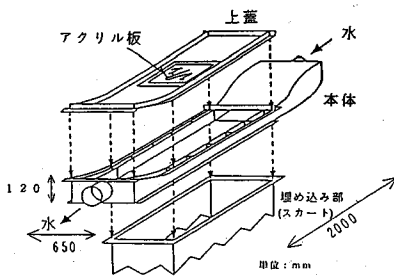
実験装置は写真一に示すように侵食試験器、水槽、ポンプ、導水管より構成される。侵食試験器本体は高さ12 cm、幅40 cm、長さ200 cmである。これらのうち水槽、ポンプ、導水管は固定されており、侵食試験器は各ケースごとに新しい場所に移動し実験を繰り返した。侵食試験器は図三に示すように上蓋、本体、スカート部から成る。管内を流れる圧力のかかった水が侵食試験器から外部に流れ出ないように、スカート部を地中に十分貫入させている。本体をスカートに固定して上蓋をすると、芝を底面とする閉管路となる。上蓋には流況を観察するための窓がついている。

本体側面上、中、下面にピエゾ管を設置し、流量、ピエゾ水頭の測定から芝の面に作用する底面せん断力を求めた。

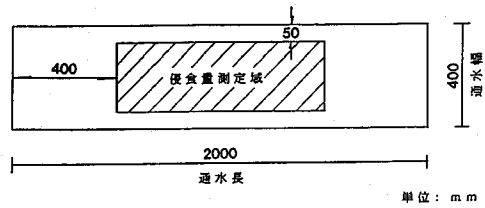
実験は流量調整の後、通水開始→流量・圧力水頭の測定→通水終了→排水→侵食深の測定という手順を繰り返すものである。最初、バイパス管路に通水し、流量を合わせた後、侵食試験器に通水し、所定の流量に調整される。侵食深の測定中もバイパス管路を用いて回流させて



写真—1 実験装置の全景



図—3 侵食試験器



図—4 侵食深測定範囲

おく。上記の手順を、流量を一定として 30分×4 回の計 120 分間行う。すなわち、侵食深は原則として 30 分後、60 分後、90 分後、120 分後に測定される。ただし、初期の段階で侵食深が大きくなる場合には 5 分後、10 分後、15 分後にも侵食深の測定を行った。以上のように各試験場所について流量を一定とした、120 分間の通水を 1 ケースとして、流量を変えて 3~4 ケースの実験を行う。各ケース毎に試験面を変え測定する必要があるため、その度ごとに新しい試験面の場所に試験器を移動させる。

侵食深測定範囲は、入口と出口、側面の影響を考慮し、図—4 のように定めた。

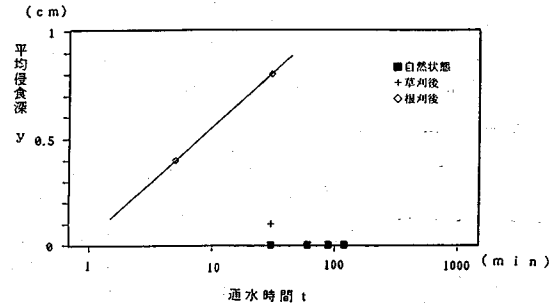
侵食深の測定は横断面内の底高を一度に測定し得る装置を用いて求めた⁶⁾。

流量は、瞬間流速計及び積算流速計により測定した。

(3) a 地点における実験

実験は初期流速 $V_0=2.0 \text{ m/s}$ のみの場合について行った。初期流速とは、流量を初期断面積 (実験開始前の平均断面積) で割った値である。侵食を受けると断面積は変化するので侵食を受けている過程での流速とは区別する。

図—5 に平均侵食深 y と通水時間 t の関係を示す。自然の状態では、a 地点は初期流速 $V_0=2.0 \text{ m/s}$ でほとんど侵食されないことがわかる。表—1 に示すように a 地



図—5 a 地点の平均侵食深と通水時間の関係

点は、砂分が他の地点に比して 71% と断然多いにもかかわらず、このように侵食されなかったのは芝は被度が 5 と最も密生しており、しかも根が 30 cm と十分深くまで入り、表土を保持していたためである。

この場所の芝の生育状況から、流速をさらに増大させても侵食は起こらないものと判断された。そこで、芝の葉や根毛層が侵食抵抗にどの程度寄与しているかを調べるため以下の実験を行った。まず、芝の地表面に出ている部分が侵食抵抗に果たす役割を調べるために、葉と茎を刈った状態で、 $V_0=2.0 \text{ m/s}$ で実験を行った。30 分間の通水では地表面はほとんど侵食されなかったためこの段階で通水を終了。つぎに表土をはぎ、地面から 3 cm まで根毛層を刈りとった。この状態で $V_0=2.0 \text{ m/s}$ の通水を行ったところ侵食が確認されたので、通水開始 5 分後、および 35 分後に侵食深の計測を行った。結果

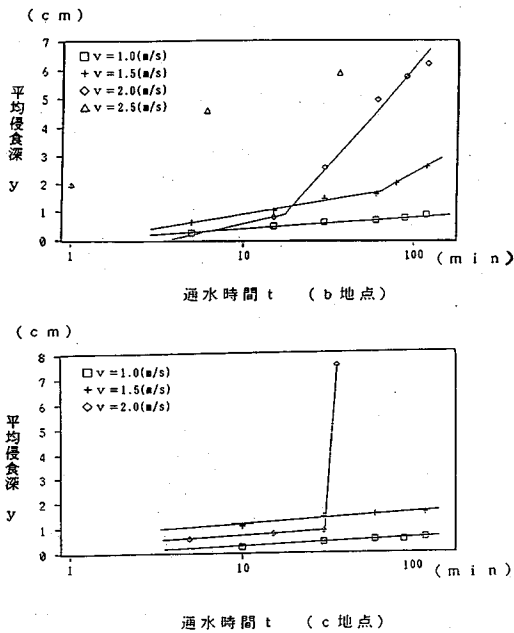


図-6 b地点およびc地点の平均侵食深と通水時間の関係

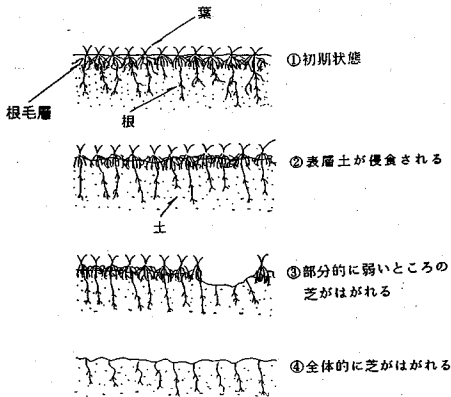


図-7 侵食過程

は図-5に示すように根毛層がはがされた場合、大きな侵食が生じた。この一連の実験より、侵食抵抗を支配する主要な部分は根毛層であることが確認された。

(4) b地点およびc地点における実験

実験は初期流速 $v_0 = 1.0 \text{ m/s}$, 1.5 m/s , 2.0 m/s , 2.5 m/s の4ケースについて行った。図-6にb, c, 両地点における各ケースごとの平均侵食深 y と通水時間 t の関係を示す。平均侵食深は通水初期に急激に増加し、以後時間が経つにつれ増加速度が小さくなる。図-6より y と t の関係は既報^{2),3)}の式(1)で表せることがわかる。

流速が大きくなると、もはや式(1)では表せなくなる。(この限界はb地点で $v_0 = 2.0 \text{ m/s}$, c地点で $v_0 = 2.0 \text{ m/s}$) これは芝の表面が完全に破壊され、侵食の機

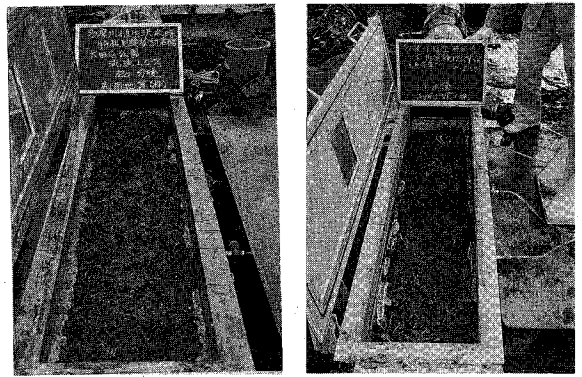


写真-2 侵食過程②

写真-3 侵食過程③

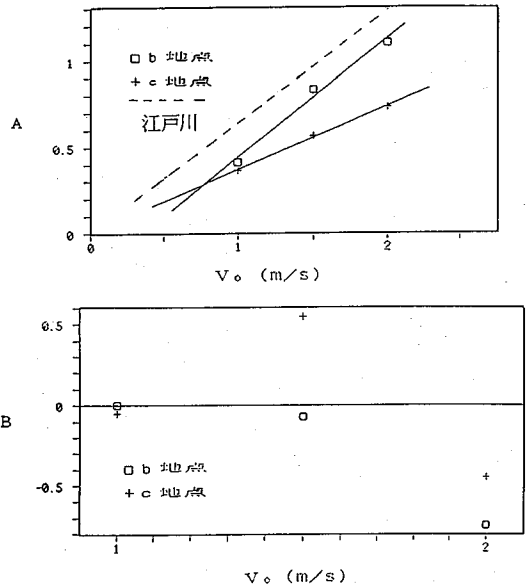


図-8 初期流速とA, Bの関係

構が芝がある場合と異なるためである。

観察から、流水による野芝の侵食は図-7に示す4段階の過程で進行することがわかった。通水初期には表層の土が根の間から抜け出ていく(写真-2)。次に部分的に弱いところ(被度が小さい、根が浅い、レキが存在する等)の芝が根毛層ごとにはがれる(写真-3)。部分的に芝がはがれると、その周囲が侵食されやすくなり、やがて全体的に芝がはがれる。なお本研究で対象としているのは図-7の過程①~③の段階である。図-6より式(1)のA, Bの値を直線回帰によって求め、各初期流速 v_0 とA, Bとの関係を図-8に示す。Aの値については、江戸川の実験^{2),3)}と同様に v_0 にほぼ比例する関係がみられる。一方、Bについては v_0 にほとんど関係ないようである。Bの値は式(1)より、 $t = 1$ 分における平均侵食深で、通水初期に侵食される表層の厚さを表す。実

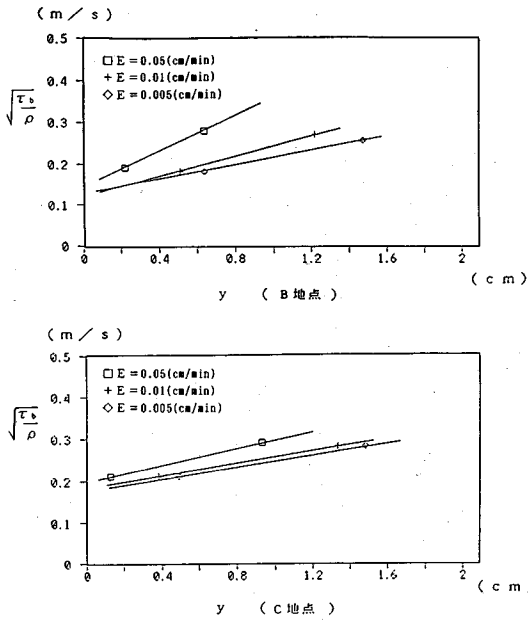


図-9 E をパラメータとしたときの y と $\sqrt{\tau_b}/\rho$ の関係

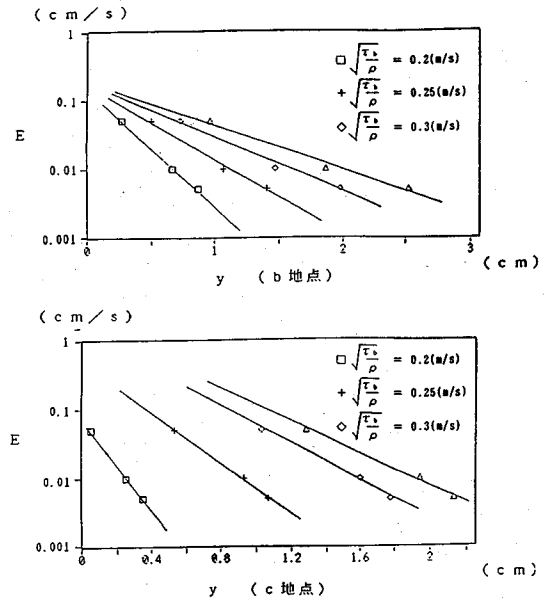


図-10 $\sqrt{\tau_b}/\rho$ をパラメータとしたときの y と E の関係

験精度からみても B の値を見積るのは難しく、またその値は 0 であるとみなしても問題はない。したがって、野芝の侵食抵抗には A の値が重要となり、以下で A の値を水理量、土質、芝の特性との関係で検討する。

3. 実験結果の検討と考察

(1) 芝面に作用するせん断力と A の関係

実験は高さ 12 cm の閉管路で行っている。実河川は洪水時の水深が大きいことを考えると、実験装置内における平均流速と実河川の平均流速を対応させることは芝の侵食に対してあまり意味をもたない。芝面に働く力はせん断力であるので、侵食深は底面せん断力を外力として表現するのが物理的に正しいといえよう。また、実験は流量一定の条件で行っているため、侵食によって断面積が変化すると流速、せん断力も変化する。我々が最も知りたいのは実際に作用している底面せん断力 τ_b に対する A の関係である。そこで、まず摩擦速度 $\sqrt{\tau_b}/\rho$ が一定の時の $A \sim \sqrt{\tau_b}/\rho$ 関係を求めることにする。以下に示す実験データの整理は福岡、藤田^{2),3)}の方法にならう。

底面せん断力 τ_b は、マンニングの式を用いると式 (2) で表される。

$$\tau_b = \rho g n_g^2 v^2 R^{-1/3} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 n_g : 芝面の粗度係数、 v : 平均流速

式 (2) において、 n_g は未知量である。 n_g は、管路全体の合成粗度係数 n と鋼板部分 (上面と両側面) の粗度係数 n_s からアインシュタインとバンクスの補正方

法³⁾を用いて算出する。 n は流量 Q 、管路の幅 W 、管路の高さ $H = (H_0 + y)$ 、ピエゾ計水頭勾配 I の測定値から求まる。 H_0 は初期通水深で 12 cm、 n_s は 0.012 と仮定し、式 (3) より n_g を算出する。

$$2(H+W) \cdot n^2 = (2H+W) \cdot n_s^2 + W \cdot n_g^2 \dots \dots \dots (3)$$

これより求めた b 地点での n_g は 0.038、c 地点の n_g は 0.042 である。

つぎに摩擦速度に対する A の値を求める。式 (1) を時間 t で微分すると侵食速度 E と平均侵食深 y の関係が式 (4) のように求まる。

$$E = \frac{dy}{dt} = \frac{A}{\ln 10} \cdot 10^{\frac{E-y}{A}} \dots \dots \dots (4)$$

式 (4) を y について解くと式 (5) を得る。

$$y = B - \frac{A}{\ln 10} \cdot \ln \left(E \frac{\ln 10}{A} \right) \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) から $y \sim \sqrt{\tau_b}/\rho$ 平面上に E についての等コンター線を描くことが出来る。図-9 にその結果を示す。

更に、このグラフより $\sqrt{\tau_b}/\rho$ が一定のときの $y \sim E$ 関係が求まり、その結果を図-10 に示す。

これらのグラフから $y \sim E$ 関係を式 (6) で表せることがわかる。

$$\log E = a_0 \cdot y + b_0 \dots \dots \dots (6)$$

式 (4) と式 (6) を比較すると A と a_0 の間に式 (7) が成り立つ。

$$A = -\frac{1}{a_0} \dots \dots \dots (7)$$

B については、前述の考察により 0 とする。図-10 より求めた a_0 と式 (7) を用いて、各摩擦速度 $\sqrt{\tau_b}/\rho$ に

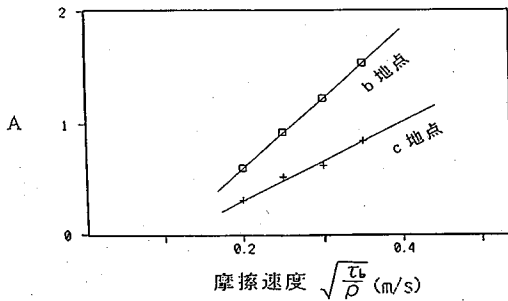
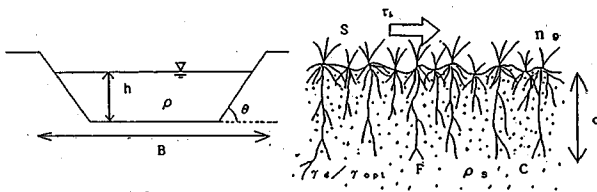


図-11 $\sqrt{\tau_b/\rho}$ と A の関係

表-2 α と β の値

	α	β
a地点	0	0
b地点	6.4	-0.11
c地点	3.7	-0.08
江戸川 ⁽²⁾⁽³⁾	0	0



- 物理量
- | | |
|--------------------------------|--------------------|
| 平均侵食深 : y | 芝の粗度係数 : n_g |
| 侵食時間 : t | 芝の根の最大深 : d |
| せん断力 : τ_b | 水深 : h |
| 土粒子の粘着力 : c | 川幅 : B |
| 水の密度 : ρ | 重力加速度 : g |
| 土粒子の密度 : ρ_s | 土中に占める細粒度の比率 : F |
| 堤防の法面勾配 : θ | 芝の被度 : S |
| 締固め度 : γ_d/γ_{opt} | |

図-12 侵食深に關係する物理量

対する A を計算すると図-11 を得る。これより A と $\sqrt{\tau_b/\rho}$ の関係を式 (8) で表現する。

$$A = \alpha \cdot (\sqrt{\tau_b/\rho} + \beta) \dots \dots \dots (8)$$

図-11 より α および β の値を計算すると表-2 が得られる。式 (8) によれば $\sqrt{\tau_b/\rho}$ が $-\beta$ 以下の値で A が負、すなわち侵食が起こらないことになる。つまり $-\beta$ の値が侵食を起こす最小の $\sqrt{\tau_b/\rho}$ を表しているとも考えることができる。 β の値は表層の状態によって規定されるものと考えられるが、表-2 を見る限り、その β がとる値の範囲も小さいので 0 として扱ってよいと思われる。したがって平均侵食深は式 (9) で表現される。

$$y = \alpha \sqrt{\tau_b/\rho} \log t \dots \dots \dots (9)$$

(2) 平均侵食深の次元解析的考察

式 (9) は、実験から得られた近似式であり、 α の内容は未知である。以下に、 α の関数形について検討する。

侵食深には水理量の他に土質や芝の性質が複雑に絡み合い、これを理論的に解くことは困難と思われる。ここでは次元解析手法を適用し検討する。堤防上の芝の平均侵食深 y に關係する物理量は図-12 に示すように侵食

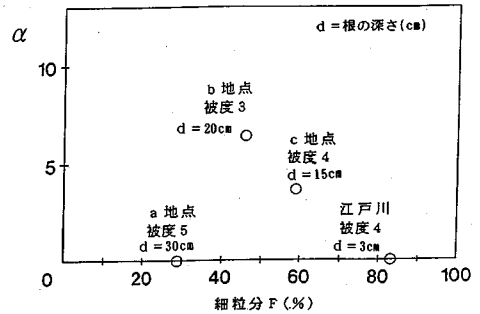


図-13 α と各要因の關係

時間 t 、水深 h 、川幅 B 、底面せん断力 τ_b 、土粒子の粘着力 c 、水の密度 ρ 、土粒子の密度 ρ_s 、芝の粗度係数 n_g 、芝の根の深さ d 、重力加速度 g 、堤防の法面勾配 θ 、土の締固め度 γ_d/γ_{opt} 、粒径 75μ 以下の土の細粒分の比率 F 、芝の被度 S 等である。次元解析によって平均侵食深を無次元量で表すと式 (10) となる。

$$\frac{y}{d} = f\left(\frac{\tau_b}{c}, \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \cdot \frac{t}{d}, \frac{h}{B}, \frac{\tau_b}{\rho g h}, \frac{d}{h}, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{g n_g^2}{h^{1/3}}, S, \theta, F, \frac{\gamma_d}{\gamma_{opt}}\right) \dots \dots \dots (10)$$

式 (10) 右辺のうち堤防上の芝の侵食深に直接影響を与える無次元量は式 (11) となる。

$$\frac{y}{d} = f\left(\frac{\tau_b}{c}, \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \cdot \frac{t}{d}, S, F\right) \dots \dots \dots (11)$$

式 (11) では、平均侵食深を支配する無次元量から堤防法面勾配 θ が除外されている。この理由は次のように説明される。本研究は、芝で覆われた地表面の根毛層がかなりの程度破壊されるまでの段階(図-7の①~③)を対象としている。この段階までは地表面、または堤体面沿いに流れる洪水流に対しては、根毛層は法面勾配に關係することなく、表層土の侵食を抑制し、固定化することからである。

式 (11) の時間 t を含む項について対数を取り、実験式 (9) の形を考慮すると式 (12) が導かれる。

$$\frac{y}{d} = f\left(\frac{\tau_b}{c}, S, F\right) \cdot \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \cdot \left\{ \log t + \log \left(K \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\tau_b}{\rho} \right) \right\} \dots \dots \dots (12)$$

実験結果から式 (12) の最後の項は小さく、ゼロと考えてよいので、侵食深は式 (13) で表される。

$$y = f\left(\frac{\tau_b}{c}, S, F\right) \cdot d \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \cdot \log t \dots \dots \dots (13)$$

式 (13) と式 (9) を対比すると α は土粒子に働く力、土の細粒分の割合、芝の被度、芝の根の深さの関数で示される。

(3) α と土質・芝の關係

次元解析と実験結果を踏まえて α について考察する。実験を行った 4 地点についてシルトと粘土で示される土

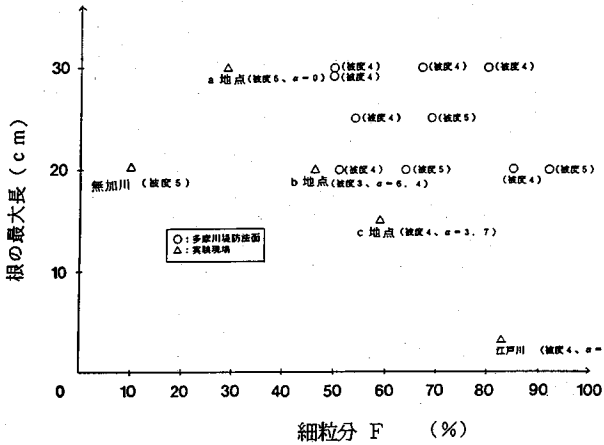


図-14 多摩川堤防の土質と芝の根の深さ

の細粒分、芝の被度、芝の根の深さと α の関係を図-13に示す。ここで土粒子の粘着力は含まれている土の細粒分に依存すると考え、土の性質を細粒分で代表している。図-13より、これら3地点における α と細粒分の関係はほぼ直線で近似できるようである。すなわち α は細粒分 F を用いて、近似的に式(14)で表現される。

$$\alpha = -0.18F + 14.5, F > 40\% \dots\dots(14)$$

現地実験と並行して多摩川の堤防10箇所での芝の根の深さと根が入っている表層部分の土質を調べた。この調査結果を図-14に示す。これより、多摩川堤防表土に含まれる細粒分は50%以上、そこでの芝の被度は4、根の深さは20cm程度であるとみてよい。

これより、江戸川、b、c地点における土質、芝の根の深さの関係は多摩川堤防調査地点の土質、芝の根の深さの関係に対し、下限の包絡線を与えていると考えてよい。このことから判断して、 α と F の関係を与える式(14)を実堤防に適用すると、安全側の解を与えることになる。

式(14)ではa地点のデータは除外されている。a地点は細粒分が少なく、砂が多い土質からなっており、多摩川堤防の土質調査からも明らかなように、堤防の表層土質を代表するものとはなっていないと考えられる。この場所の芝は被度が5、根の最大侵入長が30cmと生育が良好であった。このように砂分が多く、適度にシルト分が混じっていると芝が密に生育し、これによって表層土が強く保持され侵食抵抗が非常に大きくなる。この場合は $\alpha=0$ と考えてよい。

以上の考察から侵食抵抗が大きくなる($\alpha=0$)芝と土質の関係は次の2つの場合が考えられる。第一は表層土に細粒分が多く土質自身が侵食に抵抗できる場合である。第二は表層土に砂分が多くこれにシルトが30%程度混入することによって芝の生育がよくなり、芝の根が土を保持する力によって侵食抵抗が大きくなる場合である。ただし、砂分だけからなる地表は芝が生えていて

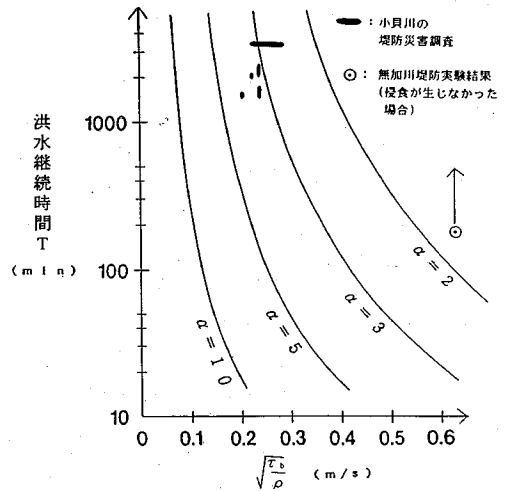


図-15 野芝の侵食限界判定図

も流水によって容易に侵食されることは周知のことである。

(4) 野芝の侵食限界

野芝の侵食深は式(15)で与えられる。

$$y = (14.5 - 0.18F) \sqrt{\frac{c_b}{\rho}} \cdot \log t \dots\dots(15)$$

野芝をもつ地表がある深さ侵食されるとやがて芝による保護効果が期待できなくなる。このような侵食を引き起こす水理条件、土質条件、芝条件について検討する。このときの平均侵食深 y を限界侵食深 y_{cr} と呼ぶ。前述のように、芝は地表面下の根毛層で土を保持しているが、侵食深が根毛層の底部付近まで及ぶと芝の根がはぎとられ、その後急激に侵食が進む。しかし、侵食は平均的に進むのではなく弱い部分が局部的に侵食を受けて根がはがされ、それが全体に及んでゆく。したがって、平均侵食深が根毛層厚に達する前に、芝による侵食保護効果が失われる。したがって安全側に見積って、限界侵食深 y_{cr} は芝の根毛層厚の半分にとればよいと思われる。根毛層厚はa、b、c地点とも約5cmである。多摩川の堤防調査でも根毛層厚は約5cmであったので $y_{cr}=2.5$ cmを選ぶ。

式(15)で時間 t は冠水時間であり水位が高水敷の高さ以上にある時間を選ぶ。 $y=y_{cr}=2.5$ cmとしてとり得る範囲の α の値をパラメータとしたときの侵食限界を与える $\sqrt{\tau_b/\rho}$ と t の関係を図-15に示す。摩擦速度と高水敷冠水時間の関係が、その地点の α に対する曲線より右上にくると、芝による抵抗が期待できなくなり、地表面の大きな侵食が起こることになる。以上のことから、図-15および式(14)より求まる α を用いて、土質および芝の特性に対し侵食限界を推定することができる。

表一三 無加川堤防越流実験

ケース	幅(m)	越流時間(h)	水深(cm)	流量(m ³ /h)	草丈(cm)
1	4	1	5.1	1.88	5
2	2	1	8	2.34	5
3	2	1	8	2.18	葉はぎとり
4	2	1.0(min)	8	2.18	根はぎとり
5	2	3	8	2.35	2.0

4. 現地河川への適用と提言

(1) 小貝川における堤防被災調査⁹⁾

出来る限り大きな試験器を用いた今回の実験においても試験器内で実河川の芝堤防と同じ機構で侵食が起きているという保証はない。そこで、実際の芝堤で生じた被災と本実験結果をもとに導かれた図一15を比較することにより本推定法の有効性について検討を行う。

昭和61年の小貝川洪水により、芝の根がはぎ取られ土が露出した堤防部分について冠水時間と底面せん断力を算出し、この結果を図一15に示す。なお、冠水時間は自記水位計による水位～時間曲線と侵食箇所近傍の洪水痕跡水位から推定し、底面せん断力は航空写真より得られている当該地点の表面流速と水深、マンングの粗度係数を用いて等流近似で求めた。洪水後の調査で激しい侵食を受けた芝堤防の部分の侵食深は概ね2~3cmであったので、ここでも限界侵食深 y_{cr} は2.5cmとした。図一15にプロットされている小貝川の芝被害は $\alpha=5$ の曲線右側に集中している。当該堤防の表層土質、芝の調査から細粒分は60%程度、被度が4、根の深さが15cm程度であることがわかっている。図一13を準用すると、この条件では α が5程度となり、実河川の侵食限界に対しても図一15はほぼ妥当な推定を与えるものと判断される。

(2) 常呂川水系無加川における堤防越流実験

昭和55年常呂川水系無加川の左岸沿いを流下している小町川の切替に際し、無加川左岸堤防が開削されることになった。北海道開発局網走開発建設部は、この機械を利用し無加川堤防での越流実験を行った⁷⁾。実験は、堤内地側を人工的に締切り湛水させ、一定時間越流させて芝堤防の侵食状況の観察と、測定を行った。表層土の土質、芝の特性を表一に、また粒径加積曲線を図一1に示す。表層土は砂、レキ分が多く、細粒分は10%程度である。

芝の被度は5、根の深さは最大で20cmである。図一14にこの地点の芝と土質の関係もプロットされているが、この地点は多摩川のa地点に近い芝と土質の特性を持っていると解釈される。実験は表一3に示す5つのケースで行われた。芝が生えているケース1~2およびケース5については、測定時間1時間~3時間では芝の破壊は起こらなかった。ケース3は、芝の根は残し葉のみを刈り取った堤防表面を越流させた場合であるが、こ

表一四 多摩川の土質および芝の調査結果

	深さ(cm)	a地点	b地点	c地点	ガス橋	中原
レキ (%)	5	0	4	13	1	0
	10	0	0	14	2	0
	15	0	0	20	1	6
	25	28	18	36	0	30
	40	25	19	43	0	15
	平均	10.6	8.2	25.2	0.8	10.2
粗砂 (%)	5	2	7	5	2	0
	10	5	1	10	5	1
	15	2	1	11	3	6
	25	35	17	11	0	15
	40	23	10	11	0	6
	平均	13.4	7.2	9.6	2	5.6
細砂 (%)	5	69	43	23	16	77
	10	68	42	23	27	68
	15	71	70	22	35	53
	25	21	28	13	23	20
	40	29	27	13	38	13
	平均	51.6	42	18.8	27.8	46.2
シルト分 (%)	5	23	30	38	68	16
	10	21	39	33	52	22
	15	21	20	27	50	27
	25	12	24	25	67	23
	40	16	29	20	55	44
	平均	18.6	28.4	28.6	58.4	26.4
粘土分 (%)	5	8	16	21	13	7
	10	6	18	20	14	9
締固め度	0~10	91.1	90.3	96.9	88.2	79.9
	間隙率	0~10	52.3	50.7	59.6	49
空隙率	0~10	7.5	10.8	12.7	16.5	30.2
	コーン指数 (kgf/cm ²)	5	7.66	16.68	14.9	6.06
土質硬度 (kgf/cm ²)	10	10.62	21.2	25.5	16.04	0.4
	15	10.74	25.24	*	*	0.8
	20	7.88	*	*	*	16.3
	25	12.08	*	*	*	*
	30	19.5	*	*	*	*
	限界	40	20	15	15	25
根の腐厚 (cm)	5	3.7	4.1	2.3	10	2.2
	10	4.3	4.1	5.6	20	2.7
	15	1.7	4	7.5	20	4.3
	平均	3.23	4.07	5.13	16.67	3.07
芝の被度	最大	5	5	5	5	15
	マット状	30	20	15	15	25

の場合も1時間の通水中に表面の侵食は生じなかった。一方、ケース4は堤防法面の表層20cmを掘削し、根をはぎ取り実験を行ったもので、越流開始と同時に大きな侵食が起こり、越流後わずか10分で法面の大部分が侵食され、崩壊した。このことより、無加川の堤防は本実験のa地点の結果(図一5)と同様に芝の根が侵食抵抗に大きな影響を果たしていたことは明らかである。

以上のことから芝の侵食抵抗の代表ケースとして、最も通水時間の長いケース5を図一15にプロットする。このとき摩擦速度は、芝斜面上の流れを等流と見なし、水深と法面勾配 ($\tan\theta=0.5$) から求めた。この通水時間内では侵食がみられなかったが、侵食が起こる限界の時間まで通水したとすると、プロットされた点は同じせん断力で t が大きくなる矢印の方向に移動する。これより実験を行った堤防の α の値は0に近かったものと推定される。このことは同様な土質と芝の特性を持つa地点の結果からも容易に推定可能である。

(3) 堤防構造の提案

近年、河川の安全性を確保しながら自然性豊かな川づくりの施策が進められている。堤防は代表的な河川構造物であり、堤防の構造をどのようなものにするかは最も重要な課題のひとつである。堤防は流水の侵食作用に対

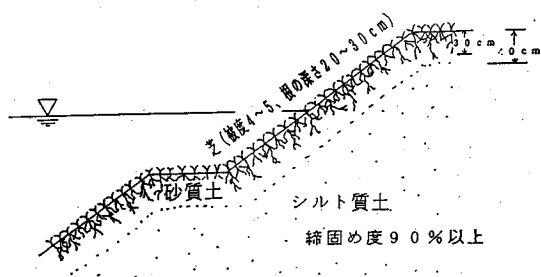


図-16 芝堤防の構造の提案

して強く、また外水や雨水の浸透作用に対しても強いことが求められている。芝堤防については、流水に対する侵食抵抗は前節までの方法で推定できるようになった。本節では堤防を新たに造る場合や堤防を改築する場合の芝を持つ堤体の土質構造について現地実験から得られた結果を踏まえて検討する。

多摩川の現堤防で芝の根が入っている表層土をサンプリングし、土質試験を行った。この結果と実験地点の結果を併せて表-4に示す。a地点、ガス橋、中原、b地点、c地点の5カ所における土質と芝の調査結果を総合的に検討すると、芝の生育上好ましいのは粘土分が少なく、コーン指数、土壌硬度、締固め度が小さい土質であることが明らかである。

浸透に対する抵抗が大きい土質は、締固め度が大きく細粒分の多い土である。現在の堤防基準¹⁰⁾では細粒分が15%以上、締固め度が80%以上となっている。これは最低基準であり、浸透に対する抵抗を大きくするには、細粒分と締固め度を大きくとる必要がある。

前述のように侵食抵抗を大きくするには、表層土の細粒分を多くする(70%以上)か、または砂分が主体でこれにシルトが適度に混じった(細粒分30%程度)表層土質によって芝の生育を良くすることによって達成される。しかし、表層に細粒分が多い堤体では芝の根の侵入が浅く、被度も小さくなり、芝の生育は必ずしもよくない。また外観もよいとはいえない。したがって表層土質については、芝の生育を良くする土質で、かつ流水に対する侵食抵抗を大きいものを選ぶのが望ましい。芝が良く生育するには堤防表層が砂分の多い土質であることから外水や雨水の浸透に対して弱くなる心配がある。そこで、表層を除く堤体本体は浸透に対する抵抗の大きい、細粒分の多い土質からなり、表層は芝の生育上好ましい砂中心の土質からなる堤防が考えられる。

以上のことから、浸透と侵食に対して強く、環境上、景観上もよい堤防として次のような構造が考えられる。図-16に示すように表層40cmには締固め度85%程度、細粒分の少ない細砂を用いることによって被度4~5、根毛層厚5cm、根の最大侵入長20~30cmの芝の生育が期待できる。このような芝は流水による侵食に対して

かなり大きな抵抗力を発揮する。そして40cm以深の土は締固め度、細粒分ともに大きくなるような土質を選ぶことにより、強度的にも、また雨水、洪水の堤体内への浸透に対しても強い構造の堤防をつくることができる。ただし、この堤防が機能を維持するためには芝堤防先が洗掘されないように十分な保護対策を行うことが重要である。

5. 結 論

現場侵食試験器を用いて野芝をもつ地表面の流水に対する侵食抵抗を明らかにするため、土質の特性、芝の生育状況と侵食深の関係を調べた。主要な結論をあげると以下のようである。

- ① 土質、芝の特性と侵食抵抗の関係を求め、野芝を持つ堤防の平均侵食深を表現する関係式を示した。
- ② 野芝を持つ地表面の侵食抵抗が大きくなるには土質と芝の関係について次の2つの場合があることを明らかにした。第一は細砂が主体の土質で芝自身の根が侵食に抵抗する場合、第二は土の細粒分が侵食に抵抗する場合である。
- ③ 洪水流のせん断力と芝の冠水時間の関数として野芝の侵食限界を評価する方法を示した。芝堤で生じた被災や実大堤防越流実験の結果を用いて、この方法の適合性を検討することにより侵食限界図の有効性を示した。
- ④ 芝が十分に生育し、流水による侵食や雨、および外水の浸透に対して強度を発揮する堤体の土質構造を明らかにし、芝堤の構造の提案を行った。

今後は本研究の結果を用いて芝張堤防の設計、施工を行い、芝張堤の侵食抵抗を評価する。これらの現地データの蓄積によって、芝張堤の設計法を確立することが課題である。

本研究を遂行するにあたって、建設省土木研究所河川研究室・藤田光一主任研究員からは有益な助言を頂いた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局監修：改訂建設省河川砂防技術基準(案)～調査編～，山海堂，pp. 527～543, 1977.
- 2) 福岡捷二・藤田光一・加藤善明・森田克史：堤防法面の芝の耐侵食特性，土木技術資料，第29巻12号 pp. 44～49, 1987.
- 3) 福岡捷二・藤田光一：堤防法面張芝の侵食限界，水工学論文集，第34巻，pp. 319～324, 1990.
- 4) 富田和久・宇賀和未・長谷博幸・藤堂正樹・伊東重文：芝の耐侵食性に関する基礎実験について，土木学会第47回年次学術講演会，pp. 420～421, 1992.
- 5) 富田和久・宇賀和未・長谷博幸・並木嘉男・藤堂正樹：芝張工の耐侵食性についての現地観測，土木学会第47回年次学術講演会，pp. 418～419, 1992.
- 6) 福岡捷二・内島邦秀・山坂昌成・早川 博：交互砂州上

- の流砂量分布, 第 27 回水理講演会論文集, pp.703~708, 1983.
- 7) 渡辺誠・寺田忠雄・秩父亮一: 既設築堤における堤体強度実験について, 第24回北海道開発局技術研究発表会, pp.271~280, 1981.
- 8) Einstein, H. A. and Banks, R.B.: Fluid Resistance of composite roughness, Trans. A.G.U. Vol.31, No.4, pp.603~610, 1950.
- 9) 福岡捷二・藤田光一・森田克史: 越水を伴う洪水流による堤防破壊機構の調査解析, 土木技術資料, 第30巻3号, pp.21~26, 1988.
- 10) 日本河川協会: 河川土工指針(案), pp.43~51, 1976. (1993.5.10 受付)

EROSION RESISTANCE OF GRASS-COVERED LEVEES AGAINST THE FLOWING WATER

Shoji FUKUOKA, Wataru WATANABE and Takaharu KAKINUMA

People's interest in rivers seems to concentrate on the close-to nature work. However, it has not yet attained the stage estimating the erosive resistance of grass-covered levee which is one of the most important close-to nature work of rivers. In order to estimate the erosion threshold of grass-covered levees and to use as basic reference data in levee design, we performed erosion experiments on the grass-covered flood channels under certain hydraulic conditions, grass and soil properties. Erosion resistance of grass-covered surface and erosion limit are shown to be expressed in terms of bed-shear stress, erosion time, soil and grass properties. The applicability of this predicting method is confirmed by flood data and levee overflow experiment in situ.