

堤防の耐侵食性の評価方法に関する研究

Study on estimation method of erosion-resistance of levee

服部 敦*・平館 治**・藤田光一***・宇多高明****・関口利昭*****・宮下光泰*****

By Atsushi HATTORI, Osamu HIRATATE, Ko-ichi FUJITA, Takaaki UDA,

Toshiaki SEKIGUCHI and Mitsuyasu MIYASHITA

SUMMARY

The estimation of erosion-resistance of vegetation-covered levee is very important to enhance the safety of levee. In order to establish the estimation method of erosion-resistance, two flume erosion experiments were performed using undisturbed vegetation-covered test pieces sampled from levee and floodplain. The erosion-resistance of levee is expressed in terms of shear velocity and the density of plant roots defined by the weight in a unit volume of levee solid. The estimation method of erosion-resistance of levee is proposed, being applicable to the levee design and management. Furthermore, a measuring method of the density of plant roots is proposed.

Keywords: erosion-resistance, levee, vegetation, estimation method

1. はじめに

土構造物である河川堤防ののり面には、降雨や流水による侵食を防止するため一般に植生の繁茂を許している。植生の耐侵食性を利用する従来の技術は、経験的な知見に基づいたものであり、耐侵食性を大まかに評価することは可能である。しかし、計画高水流量規模の洪水流や、越流に対して植生の耐侵食性が十分であるか合理的に判断できないため、植生の耐侵食性に関する知見を堤防の設計や維持管理に反映するまでに至っていない。そのため、侵食に対して配慮が必要と思われる堤防や越流堤には、高い侵食防止効果を有する高水護岸や覆工が造られる。しかし高水護岸や覆工は、河川の治水機能を向上させるが、自然らしい景観の面から環境機能を損ねることは否めない。多自然型川づくりが推進されている現状を考慮すれば、治水上是非とも必要な場合以外、高水護岸や覆工の設置を避けるべきである。これには、高水護岸や覆工の設置の必要性が十分な工学的根拠に基づいて示される必要があり、それに必要とされる情報の一つとして、例えば植生の耐侵食性の評価が挙げられる。そして耐侵食性の評価方法は水工学に裏打ちされた定量的判断を可能とするものでなければならない。特に、堤防に繁茂する植物の種類の多様性を勘案すると、植生のいずれの部分（根や地下茎からなる地中部分、または葉や茎からなる地上部分）が耐侵食

* 建設省土木研究所河川部河川研究室研究員（〒305 茨城県つくば市大字旭1番地）

** 建設省土木研究所河川部河川研究室

*** 建設省土木研究所河川部河川研究室主任研究員、工博

**** 建設省土木研究所河川部河川研究室長、工博

***** 建設省関東地方建設局河川部河川計画課建設専門官（〒110 東京都千代田区大手町1-3-1）

***** 建設省関東地方建設局下館工事事務所計画第二係長（〒308 茨城県下館市二木成1753）

性を主に発揮するのかを明らかにし、これと耐侵食性の定量的関係を明らかにする必要がある。

筆者らは、上記の留意事項を踏まえた植生の耐侵食性の評価方法の開発を最終目標とした植生の侵食実験を進めてきている。本報告では、それらの実験から得られた知見をまとめ、植生の耐侵食性の評価方法を開発するにあたり、どのような事項に注目した研究が今後必要とされるかについて提言してみたい。

2. 実験の概要

本研究では、目的が異なる3種類の実験を行った。それらを実験Ⅰ～Ⅲと呼ぶとき、それぞれの実験目的は以下のようなものである。

実験Ⅰ:1)植生の地中部分（根および地下茎）または地上部分（葉および茎）のいずれが耐侵食性を発揮するのか、また、2)それに関係しかつ耐侵食性を表すのに適切なパラメータを明確にすること。

実験Ⅱ:上記のパラメータの簡易測定方法を開発すること。

実験Ⅲ:設計上必要とされる上記のパラメータ値の評価方法を明らかにすること。

実験の概要を以下にまとめて示す。

2.1 実験Ⅰ 【植生のいずれの部分が耐侵食性を発揮するのかを明らかにする実験】

(a)供試体、実験装置および実験方法

実験に用いた供試体は、植生が繁茂する実堤防（江戸川、小貝川および利根川）ののり面から不攪乱状態で採取したものである。供試体の侵食面の寸法は1.2m×1.4mである。いずれの供試体も植物群落は被度5であり、また堤体土は粘着性を有して

表-1 実験Ⅰの実験ケース

ケース	供試体採取地点	供試体の表面	平均草丈 (cm)	各粒径範囲の含有率(%)		
				粘土分	シルト分	砂分
1-A	江戸川左岸20km	芝（葉有）	20	18	21	61
1-B	同上	同上（根のみ）	0	18	21	61
1-C	同上	堤体土	-	26	55	19
2-A	江戸川左岸20km	チガヤ（葉有）	20	18	39	43
2-B	同上	同上（根のみ）	0	18	39	43
3-A	小貝川右岸53km	芝（葉有）	5	27	23	50

いた。実験に用いた水路は幅1.2mの開水路で、断面平均流速（以下、流速と呼ぶ）で8m/s（水深約20cm）まで通水可能である。供試体は侵食面が水路床面と滑らかに接続するように設置した。そして、ある設定流速を所定の時間通水し、その後に平均侵食深（以下、侵食深と呼ぶ）を測定した。侵食速度は侵食深／通水時間として計算した。（実験装置および実験方法の詳細については、佐々木ほか¹⁾を参照のこと。）一つの供試体に対してA)堤防に繁茂している（植生の地上および地下部分がある）状態、B)地上部分を刈り取った状態、そしてC)堤体土のみとした状態の侵食実験を行った。各実験ケースの植生状況および堤体土の粒度特性を表-1に示す。ケース名を構成する数字はケース番号、英文字はA～Cの植生状況に対応する。

(b)侵食深の経時変化

ある一定流速を通水した場合、侵食深の増加量が時間とともに減少する傾向が見られた。また、ある侵食深を境にしてこの傾向が見られなくなり、それまでに比べて急激に侵食深が増加した（以上に述べた事項については、2.3(b)において図を用いて補足説明する）。そこで、前者の傾向を示した場合では侵食深の増加量が測定誤差（1mm程度）より小さくなった時点まで、また後者では侵食速度を計算するのに十分な精度が得られる時点まで、通水を続けた。それらの時点における侵食深と流速の関係を図-1に示す。2-Aおよび2-Bで流速5m/sを通水したとき、急激に侵食深が大きくなる傾向が見られる。

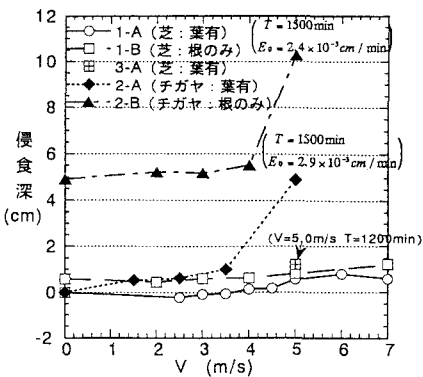


図-1 侵食深と流速の関係

(c)植生の耐侵食性を発揮する部分

図-1によるとシバが優先種である1-Aと1-Bでは、侵食深の増加量に大きな差がない。すなわち、植生の

地上部分の有無によって、侵食深の増加量が大きく変化しないことを意味する。よって、侵食深の増加量が時間とともに小さくなる傾向が見られる範囲において、耐侵食性は植生の地中部分が発揮すると考えて良い。チガヤが優先種である2-Aと2-Bでは、流速3.5m/s以下において上記と同様な実験結果となっている。また、流速5m/sにおける2-Aと2-Bの侵食速度 E_0 は 2.9×10^{-3} cm/min、 2.4×10^{-3} cm/minであった。ところで、ケース番号1と2は同じ地点から採取した供試体であるが、1-Cの実験結果から、堤体土のみでの侵食速度は流速3m/sにおいて0.59cm/minであった。この値を2-Aおよび2-Bの値と比較すると、2-Aおよび2-Bでは流速が2m/sも速いのに、堤体土のみに比べて2オーダーも侵食速度が小さい。したがって、2-Aおよび2-Bでは植生の耐侵食性が発揮されたが、植生の地上部分の有無によって侵食速度がほとんど変化しないと判断できる。以上より、侵食深の増加量が時間とともに小さくなる傾向が見られなくなり、それまでに比べて急激に侵食深が増加する場合においても、耐侵食性は植生の地中部分により発揮されると考えて良いであろう。以上より、耐侵食性は根および地下茎からなる地中部分により発揮されると判断される。

(d)耐侵食性を表すパラメータ

侵食面の観察結果によると、根および地下茎が地中から洗い出されて地表を覆っており、その被覆状況は根および地下茎の一本一本が重なり合って一体化した層のようであった。この層を根毛層と呼ぶことにし、次に根毛層と耐侵食性の関係について検討した。

のり面上に原点を有し、のり面に対して垂直で地中方向が正である座標軸を定めたとき、この軸方向の根毛量（単位体積あたりの堤体土に含まれる根および地下茎の重量）の分布を図-2に示す。優先種がシバである1-Aおよび3-Aは、優先種がチガヤである2-Aに比較して表層近傍の根毛量が非常に大きい。また、図-1において流速5m/sにおける侵食深を比較すると、1-Aおよび3-Aでは侵食深が約1cmであったのに対し、2-Aでは5cmに達してなお侵食が進行中であった。したがって、地表近傍の根毛量が大きいほど、耐侵食性が優れていると判断される。

次に、単位面積あたりの侵食面上の根毛層の重さ（以下、露出根毛量と呼ぶ）を、地表から図-1に示した侵食深まで図-2に示した根毛量の鉛直分布を積分することによって求めた。結果を図-3に示す。流速5m/sにおける露出根毛量をみると、シバが優先種である1-Aおよび3-Aでは 0.40g/cm^2 および 0.32g/cm^2 であり、チガヤが優先種である2-Aでは 0.11g/cm^2 であった。3-Aの通水時間が1-Aに比較して5時間短いことを勘案すると、両者の露出根毛量は同じ通水時間であればほぼ同程度になると思われる。したがって、流速5m/sにおいて侵食深の増加がほとんど測定できなくなるほど侵食速度が遅くなるには、露出根毛量が約 0.40g/cm^2 は必要と判断される。チガヤは根毛量が少なかったために露出根毛量が 0.40g/cm^2 に達しないので、侵食が進行し続けたと考えられる。以上より、地表が根毛層によって被覆することにより耐侵食性が発揮されること、また根毛層が厚いほど耐侵食性が優れていることが分かった。

これまでに示した考察に加え、根毛量が大きい領域が地表から3～5cmの範囲であること（図-2参照）を踏まえると、優れた耐侵食性が期待できるのは表層から3～5cmの範囲に限られると考えられる。2.3(b)に詳細をまとめて示すが、実験Ⅲにおいて2～5cmの侵食深を境にして(b)に述べた侵食深の経時変化に関する特徴の変化、すなわち耐侵食性の変化が見られた。また、福岡ほか²⁾ではこの変化が現れる侵食深を2.5cm

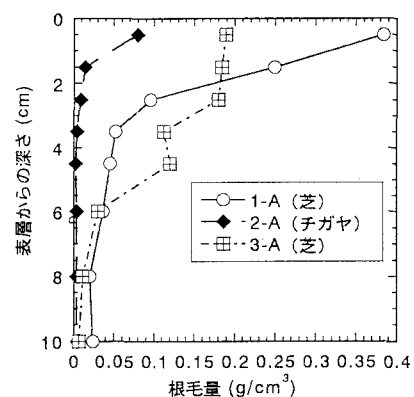


図-2 根毛量の分布

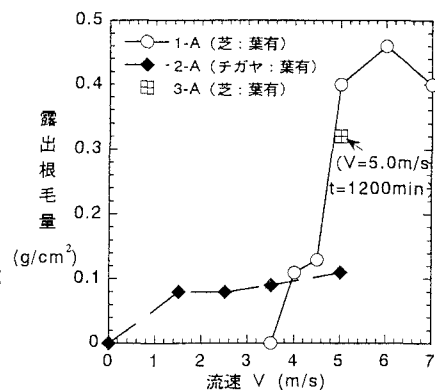


図-3 露出根毛量と流速の関係

としている。以上より、ある一定の流速（掃流力）下における侵食深の増加量が時間とともに減少する侵食特性を示す場合に対し、表層から下方3cmの範囲における根毛量の平均値（以下では平均根毛量と呼ぶ）を植生の耐侵食性を表すパラメータとすることができよう。

2.2 実験Ⅱ 【平均根毛量の簡易測定方法の開発】

平均根毛量は、のり面に塩化ビニール管を深さ3cmまで打ち込んで採取した堤体土から洗い出した根および地下茎の重量を採取した堤体土の体積で除することによって測定できる。しかし、管理の対象となる堤防のり面の面積は広大であるため、このような方法では労力が大きいと考えられる。現場への適用性を高めるためには、より簡易な測定方法の開発が必要と考えられる。本節では平均根毛量の簡易測定方法の開発を目的とした実験の結果について述べる。

(a)測定装置と測定方法

測定装置の概観を写真-1に示す。この装置は中心軸に対して同心円上に配置された金属棒を堤体土中に差し込み、さらに回転したときに作用するトルクを測定する仕組みになっている。写真-1において地面上に見られる金属製円盤の形状を図-4に示す。金属製円盤は測定位置に測定装置を固定する役割を果たす内側の円盤と、トルク



写真-1 平均根毛量の簡易計測装置

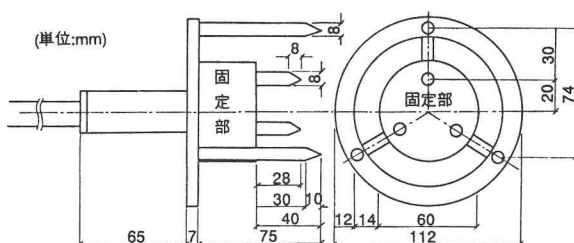


図-4 金属製円盤の形状

(b)測定原理

測定されるトルク M は、土中に差し込んだ金属棒をねじ回す際に金属棒に引っかかる根を切断するためのトルク M_p と堤体土を変形させるために必要なトルク M_s の合計である。単純に考えた場合 M_p は、根の引っ張り破壊強度と金属棒に引っかかる根の本数に依存する。根の引っ張り破壊強度については、江崎ほか³⁾が河川堤防に繁茂していたノシバ、ティフトン328（シバの一種）、チガヤそしてススキ（いずれもイネ科の植物）について調査した報告がある。それによると、引っ張り破壊強度が根の直径の0.92～1.28乗に比例し、比例定数が1200～1560の範囲にある。以上の実験報告から、イネ科の植物であれば植物の種類が異なっても、同一の根の直径であれば引っ張り破壊強度がほぼ同じであると推定される。イネ科の植物は植生管理が比較的行き届いた堤防に優先種として繁茂する状況が良く見られることから、上記の関係をを用いることは意義がある。引っ張り破壊強度が根の直径 D に比例すると仮定した場合、トルク M_p は式(1)で表される。

$$M_p \propto D \cdot n \quad (1)$$

ここで、 n は金属棒に引っかかる根の総本数である。ところで、平均根毛量 σ は根の単位体積重量を一定と仮定する（江崎ほか³⁾）と式(2)が成り立つ。

$$\sigma \propto D^2 \cdot L \cdot N \quad (2)$$

ここで、 L は根の1本あたりの長さ、 N は単位体積あたりの堤体土に含まれる根の本数である。式(1),(2)より次式が導かれる。

$$\sigma \propto M_p^3 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{N}{n^3} \quad (3)$$

L/DおよびN/n³は根の分布特性に依存すると考えられる。これらの項の変化が小さいと仮定すると、平均根毛量はM_pの関数になる。M_pは測定されるトルクMからM_sを減じることにより求められる。M_sは金属製円盤をねじ回す際に土中に差し込んだ金属棒が堤体土を押しよける抵抗に支配されると考えられる。そのような抵抗は土中に円錐を押し込むのに必要な力を測定する山中式土壌硬度計によって測定できる。M_pがM_sに比べて大きい、すなわちMと土壌硬度に相関関係が見られない場合には、M_sのMに対する寄与は測定誤差に含めて扱い、平均根毛量をM(≒M_p)の関数として表すことができる。

(c)平均根毛量とトルクMの関係

実験を行った地点の位置、土質および植生状況を表-2にまとめて示す。これらの実験地点に繁茂していた植物群落の優先種は、1地点を除いてイネ科の植物であった。測定項目は平均根毛量、写真-1に示す測定装置によって測定したトルクM、そして山中式土壌硬度計によって測定した土壌硬度である。平均根毛量とトルクMの関係を図-5に示す。優先種がイネ科の植物ではないプロットを除けば、図-5に実線で示した相関が認められる。この関係は平均根毛量が多いほどトルクMが大きくなるものであり、(b)において簡単な解析を行った結果と傾向が一致する。また、土壌硬度とトルクMの関係を図-6に示す。トルクMには土壌硬度の大小に応じて増減する傾向が見られない。したがって、トルクMは主にM_pに支配されたと考えられる。そのため、平均根毛量とトルクMに図-5に示したような相関が得られたと考えられる。

以上より、イネ科の植物が優先群落であり、シルト混じり砂質～砂質土壌の場合であれば、写真-1に示した装置によってトルクMを測定する方法が平均根毛量の簡易測定方法として利用できる。

2.3 実験Ⅲ [耐侵食性の定量的予測方法の開発に関する実験]

2.1では耐侵食性を表すパラメータとして平均根毛量が適切なことを示した。また、2.2では平均根毛量の簡易測定方法を提案し、その方法が適用可能である条件について示した。これらによって、耐侵食性を表すパラメータとして平均根毛量とトルクMのいずれも用いることができる。堤防のり面の平均根毛量もしくはトルクMのいずれかが分かれば、「耐侵食性に関する定量的な予測」が可能になるようにするのが、本研究の最終目標である。堤防の耐侵食性を考慮した設計および維持管理の立場では「耐侵食性に関する定量的な予測」の具体的内容として、「設計値として定めた掃流力とそれが作用する時間を定めたとき、その条件下で必要とされる耐侵食性が発揮されるために最低限必要な平均根毛量もしくはトルクMを予測すること」となる。以下ではこの予測を可能にする植生の耐侵食性の評価方法を開発するために行った実験結果をまとめて示す。

表-2 実験Ⅱの実験ケース

実験地点	土質状況	代表植生	被度・群度
高水数	小貝川41.2km	砂質土	ミゾイチゴツナギ エノコログサ
	鬼怒川27.5km	シルト混り 砂質土	ヒメジョオン メヒシバ ノシバ
	小貝川41.0km	シルト混り 砂質土	メヒシバ ヒメジョオン
	小貝川40.42～ 40.5km	シルト砂質	ノシバ スズメノエンドウ
堤防のり面	小貝川53.5km	シルト混り 砂質土	ノシバ スズメノエンドウ セイタカアワダチソウ
	大谷川0.2km	シルト混り 砂質土	ノシバ スズメノエンドウ
	小貝川63.0	シルト混り 砂質土	ノシバ シロツメグサ
	小貝川63.1	シルト混り 砂質土	ノシバ シロツメグサ
面	小貝川65.8～ 66.0km	シルト混り 砂質土	ノシバ セイタカアワダチソウ シロツメグサ
	小貝川67.3～ 67.5km	シルト混り 砂質土	スズメノエンドウ

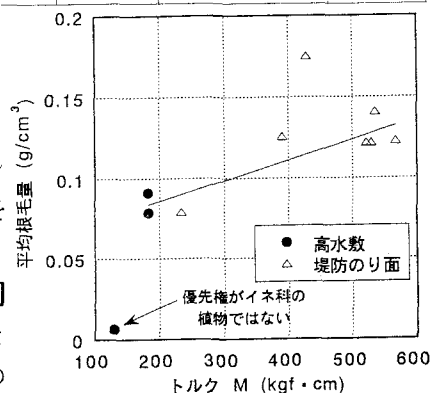


図-5 平均根毛量とトルクMの関係

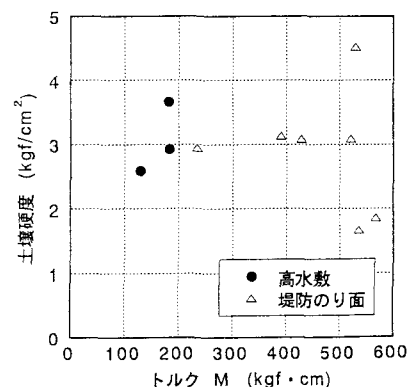


図-6 土壌硬度とトルクMの関係

表-3 実験Ⅲの実験ケース

ケース	採取場所	土質状況	代表植生	被度・ 群度	トルク M (kgf・cm)	根毛量 (g/cm ²)
case 1	鬼怒川 27.5km	シルト混り 砂質土	ヒメジョオン メヒシバ ノシバ	2・2 2・2 1・1	183.0	0.078
case 2	小貝川 41.0km	シルト混り 砂質土	メヒシバ ヒメジョオン	3・3 3・3	182.0	0.091
case 3	小貝川 48.5km	シルト混り 砂質土	ヨモギ サナエタデ	1・1 1・1	71.0	—
case 4	小貝川 9.5km	砂質土	ヌマガヤ ポントクタデ	2・2 1・1	67.5	—

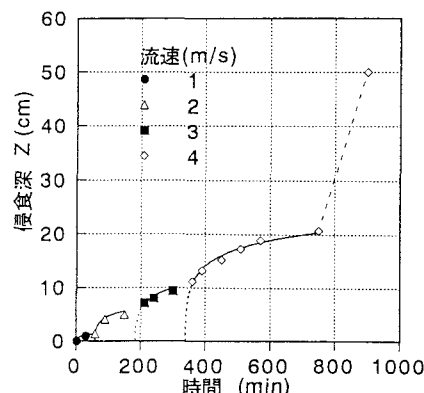


図-7 侵食深の経時変化（ケース1）

(a)供試体、実験装置および実験方法

本実験では高水敷から不攪乱で採取した供試体を用いた。供試体の採取位置は、そこに繁茂する植生が堤防のり面に繁茂する植生としても見られるものであることを条件として選定した。供試体の採取箇所と植生および堤体土の概況を表-3にまとめて示す。なお、供試体の侵食面の寸法は0.3m×3mである。実験に用いた水路は、幅0.3m、高さ0.5mの矩形管水路であり、流速4m/sまで通水可能である。侵食面に作用する掃流力は供試体の設置区間の上下流で測定したピエゾ水頭差から計算した。実験Ⅲでは植生の地上および地中部分がある状態で侵食実験を行った。上記以外の実験方法は実験Ⅰと同じである。また、供試体を採取した位置において平均根毛量およびトルクMを測定したが、その結果も前出の表-3に併せて示す。

(b)侵食深の経時変化と許容する侵食深

ケース1の侵食深の経時変化を図-7に示す。各流速ごとに見ると時間経過とともに侵食速度が遅くなる傾向が見られる。それに対して通水時間が750～900minにおいて、それ以前に比較して急激に侵食速度が速くなった。その原因は流速4m/sを通水中に供試体の下流端近傍に侵食が著しく進んだ領域が現れ、その領域が上記の通水時間中に下流端から約2m上流の位置まで急激に広がったためである。他のケースでも下流端近傍に侵食が著しく進んだ領域が形成される傾向が見られた。このような傾向が生じた原因は、侵食の進行に伴い水路床面と侵食面に段差が形成されるため水流の乱れが激しくなり、植生の根が切断されている供試体と水路床の境界から堤体土が吸い出されやすくなったためと考えられる。実験Ⅰではチガヤが優先種である供試体の侵食実験において、侵食速度が急激に速くなる現象が見られた（図-1参照）が、この原因は上記とは異なる。観察によると、侵食面を隙間なく覆っていた根毛層に斑状の穴が開き、裸地部分が現れていた。その部分では概して侵食速度が大きくなっていたので、根毛層の破壊により植生の耐侵食性が弱まったのが原因と考えられる。福岡ほか²⁾の実験にも、前記の現象と同じと思われる侵食形態が報告されている。以上に述べた現象は堤防の侵食を植生によって防ぐ計画において、のり面の侵食深をどのくらいまで許容させるかを定める上で重要な知見となろう。仮に植生の耐侵食性が失われた場合を想定すると堤防は侵食に対して無防備になるため、計画においては許容する侵食深を十分に安全側に設定しなければならない。したがって、上記のように侵食速度が急激に大きくなって侵食が進行する現象は、計画上好ましくない。そこで、その現象が生じないと確信できる最大の侵食深を計画で許容する侵食深とするのが妥当と考えられる。福岡ほか²⁾の報告、実験ⅠおよびⅢの実験結果を総合すると、侵食速度が急激に大きくなる侵食深は、2～5cmの範囲であった。本報告では、2.1(d)に示した根毛量の分布および福岡ほか²⁾が限界侵食深（上記の許容する侵食深とほぼ同じ意味）を2.5cmとしたことを考慮し、計画では侵食深を3cmまで許容してよいと考えることにする。この値は、今後の研究の進展によって、または植生の管理などの他の計画上考慮すべき事項を踏まえたより深い検討により最終的に決定されるべきである。

(c)耐侵食性の定量的予測

耐侵食性に関する堤防の設計において「設計値として定めた掃流力とそれが作用する時間を定めたとき、その条件下でののり面の侵食深が3cm以下となるために最低限必要な平均根毛量もしくはトルクMを予

測すること」が「耐侵食性の定量的予測」の具体的内容になる。すなわち、図-7に示した侵食深の経時変化において、時間の経過とともに侵食速度が遅くなる特徴を有する侵食形態を示す場合に、侵食深が3cmに達するまでの時間が予測できればよい。以下では、福岡ほか^{2),4)}が用いた解析手法を準用し、多少の検討を試みる。

福岡ほか⁴⁾は、侵食深 Z (cm)と時刻 t (min)との間に式(4)に示される関係が成立することをシバの侵食実験結果から見出している。

$$Z = A \log t \quad (4)$$

ここに、 A は耐侵食性に関係する変数であり、掃流力および植生の状況に依存する。 A が小さいほどある時刻における侵食深は浅くなる、すなわち耐侵食性に優れている。図-7の実線は、各流速における侵食深の経時変化に対して、時間軸を補正して式(4)をフィッティングした結果を示したものである。この結果に代表されるように表-3に示したいずれの実験ケースも式(4)によって侵食深の経時変化が表せる。また、流速、すなわち掃流力の増加に伴い、 A が大きくなる特徴も共通して見られる。そこで、掃流力の代表値として摩擦速度 u_* (m/s)を選び、 A と u_* の関係をまとめた結果を図-8に示す。各実験ケースとも、福岡ほか²⁾と同様に A と u_* に式

$$A = \alpha \cdot (u_* - \beta) \quad (5)$$

ここで、 α は植生の状況に依存する変数、 β は植生に被覆された堤体土の移動限界における摩擦速度である。堤体土の移動限界

時($u_* = \beta$)では当然堤体土が侵食されず、そのため根毛層が地表に現われない。この場合には植生の葉や茎によるのり面に作用する掃流力の低減効果が重要となる。したがって、厳密な耐侵食性の評価においては、根毛層だけではなく葉や茎の耐侵食性も定量的評価に取り込む必要がある。しかし、実際の計画上の観点から、葉や茎の耐侵食性は根毛層に比べて小さいこと、より高い耐侵食性を得るためにシバを高い被度・群度で維持する場合には出水期における除草回数を増やす必要があること⁵⁾など、必ずしも葉や茎の耐侵食性を定量的に考慮する必要性がない。ここでは後者の立場を取り、堤防の計画では $\beta = 0$ とすることを提案する。

α は植生の状況に依存する変数としたが、具体的にはこれまでの考察からトルク M (すなわち平均根毛量)の関数と思われる。 α とトルク M の関係を図-9に示す。ケース1, 2の供試体に繁茂していた植物群落の優先種はイネ科に属するメヒシバおよびノシバであるが、ケース3, 4ではイネ科の植物以外の植物である。2.2に示したように、現段階では平均根毛量とトルク M の相関関係がイネ科の植物が優先種である植物群落に対してのみ確認されている。そのため、ケース1, 2とケース3, 4のトルク M を直接比較しても、その比較に意味を持たせている平均根毛量の比較に現段階ではならない。しかし、実験の観察によると、ケース3, 4の供試体に繁茂していた植生群落の被度群度は明らかにケース1, 2より劣り(表-3参照)、それに対応して露出根毛量も薄かった。したがって、図-9において、ケース1, 2とケース3, 4のトルク M の比較は定量的なものではなく、定性的に根毛量の大小を表しているにすぎない。以上を考慮して図-9を見ると、トルク M (平均根毛量)が大きいほど α が小さい、すなわちある一定の掃流力に対して A が小さくなることから、耐侵食性が優れていることが分かる。また、ケース1, 2よりトルク M (平均根毛量)がほぼ同じ大きさであれば、 α もほぼ同一値となることが分かる。これらの実験結果から、 α とトルク M の関係

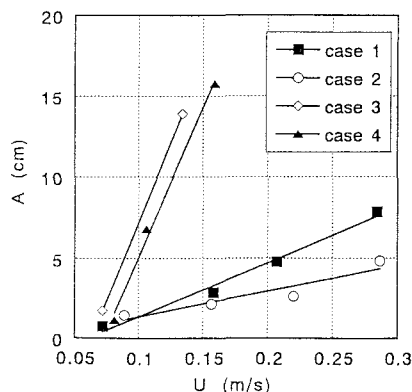


図-8 A と u_* の関係

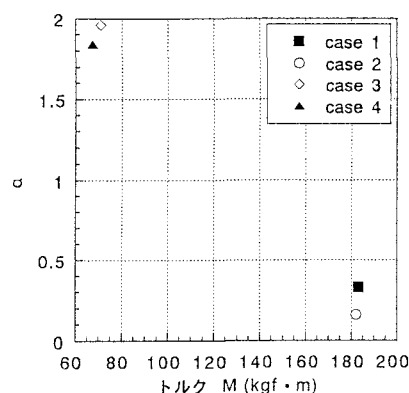


図-9 α とトルク M の関係

は実験的に定められる可能性が大きいと考えられる。

今後の研究・実験の更なる進展によりトルク M （平均根毛量）と α の関数形が定まると、植生の耐侵食性を考慮する堤防の計画において定めた掃流力の経時変化 $u_*(t)$ が与えられれば、式(4),(5)および $\beta=0$ と定めたことから、計画上生じると考えられる侵食深が式(6)によって計算できよう。

$$Z = \alpha(\sigma \text{ or } M) \cdot u_*(t) \cdot \log t \quad (6)$$

(b)に示したように計画上許容される侵食深を3cmとすると、式(6)に $Z=3\text{cm}$ を代入して計画上必要とされる平均根毛量 σ またはトルク M が計算できる。

3. おわりに

第2章に示した3種類の実験結果から、植生の耐侵食性について以下の知見が得られた。

- ①植生の耐侵食性は、根および地下茎からなる植生の地中部分により発揮される（2.1(c)参照）。
- ②侵食深の経時変化の特性（2.1(b)および2.3(b)参照）および根毛量（単位体積あたりの堤体土に含まれる根および地下茎の重量）の分布（図-2参照）を考慮すると、表層から3cmの範囲における根毛量の平均値と定義した平均根毛量が植生の耐侵食性を表すパラメータとして適切である（2.1(d)参照）。
- ③写真-1に示した装置によって簡便に測定できるトルク M は、のり面の構成材料がシルト混じり砂質土～砂質土であり、かつ植物群落の優先種がイネ科である場合において、平均根毛量と同じく耐侵食性を表すパラメータとして用いることができる（2.2(c),(d)参照）。
- ④植生の耐侵食性を考慮した計画において許容される侵食深について、侵食深の経時変化の特性（2.1(b)および2.3(b)、福岡ほか²⁾の報告）に基づいて考察した。その結果、侵食深を3cmまで許容することを提案した（2.3(c)参照）。
- ⑤侵食深の経時変化を福岡ほか^{2),4)}の方法を用いて表す場合、式(5)で定義される α は平均根毛量（もしくはトルク M ）の関数となる可能性が高いことがわかった（図-9参照）。また、同じく式(5)に定義される β は計画上の観点を踏まえると福岡ほか²⁾と同じく0とすることを提案した（2.3(c)参照）。
- ⑥上記の①～⑤の知見を総合すると、式(6)によって耐侵食性の定量的評価が可能となる。

以上の知見を用いて、堤防の耐侵食性の評価方法を開発するためには、まず実験Ⅲと同様な実験および解析を行い、図-9に示した α は平均根毛量（もしくはトルク M ）の関数形を導くことが急務となる。さらに、その関係の土砂水理学による理論的背景を構築することが、より普遍的な評価方法の開発のために重要である。上記の段階を踏まえ、次に高水敷および覆土上に繁茂する植生に対しても、⑥に述べた方法によって耐侵食性が評価できるようにする。これによって、高水敷や覆土の多自然型川づくりの理念に沿った利用および設計がより進歩すると考えられる。

参考文献

- 1) 佐々木克也ほか: 大型不攪乱供試体を用いた堤防・自然河岸の耐侵食強度評価実験, 水工学論文集, 第38巻, pp.677～682, 1994.
- 2) 福岡捷二・渡辺和足・柿沼孝治: 堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集, No.491, II-27, pp.31～40, 1994.
- 3) 江崎次夫・櫻井雄二: 造園用樹草の現存量と根茎の強さについて, 造園雑誌, 55(5), pp.181～186, 1992.
- 4) 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.
- 5) 北川 明ほか: 植生の遷移と堤防の管理, 水工学論文集, 第39巻, pp.883～886, 1995.