

# 植生の流水に対する耐侵食性

建設省土木研究所 河川研究室長 望月 達也

## 1. まえがき

河川の堤防や河岸に侵食防止のため広く使われてきたコンクリートブロックは、洪水時に安心感を与えてくれるものの最近特に評判が悪い。その理由の一つは景観上の問題である。一般に自然な川の風景は、土や砂、砂利、草木等で構成されているから、河川改修で洪水の危険が減るにつけ河川に自然な姿を求める声が強くなってきている。また、河岸のコンクリート化は、川に住む魚をはじめとする生物にとっても良い環境とは言いがた、自然の生態環境の保全が望まれている今日、この面からも空隙を有さないコンクリート護岸への風当たりは強い。そのため堤防の既設または新設コンクリート護岸の上に土砂を勾配を緩くしてかぶせたり、場合によってはさらにその上に植生を配した「覆土工法」が、多自然型川づくりの事例として実施されるようになってきているが、覆土工法は洪水時にかぶせていた土砂が流出してしまう例も多々見られる状況にある。今日コンクリートに代えて自然な土や植生を使って堤防や河岸の耐侵食性を高めたいとする要望が強くなっており土や植生の耐侵食性についての定量的な把握と適切な実施方策についての提案が求められている。本文では堤防や河岸の耐侵食性を期待した土や植生による被覆について、今日までの研究成果及び現在進められている研究を紹介する。

## 2. 堤防の植生被覆

堤防には経済面からも、従来より広く「芝」が被覆材として用いられてきた。堤防にはモグラの穴や雨水の堤防表面での流下によるガリが発生する他、場合によっては人為的な窪みが造られたり、地震時には亀裂・崩壊等が発生する可能性があるが、芝は成長しても草丈は30cm程度であり高くならないために、1mを超えて成長するような他の植生に比べて堤防本体を目視で監視する上では大変都合がよい。また堤防は盛土となっている為、他の土地と比べて土中水分が少ない等植生にとっての生育環境は良くないが、芝の根はそのような環境下でも地下茎を土中の浅いところに張って急速に繁茂する事ができる他、根は多年草で枯れにくいという、他の植生に比べて密生度が高く洪水に対する耐侵食性も大きいと考えられる。

一方、芝は成長してもあまり高くならない故に、逆にそのまま放置すれば「植生の遷移」により芝だけを維持することはきわめて難しい。一般に茎の短い芝は、草刈りをせ

ずそのまま放置しておくと、背が高いチガヤ、ススキ、ヨモギ、セイタカアワダチソウ等の雑草に取って代われ、その後さらに背の高い低木、そして高木へというように背が高く光を受けやすい植生へと遷移してしまう。図-1は東北地建岩手工事事務所で行われた堤防の植生遷移に関する調査結果であるが、堤防全面に植えた芝は概ね10年で他の侵入種に遷移してしまう。また四国地建の報告によれば、直轄堤防で通常行われている年1回から3回の草刈りでは堤防の芝群落の維持は非常に困難で、最低限年4回の草刈

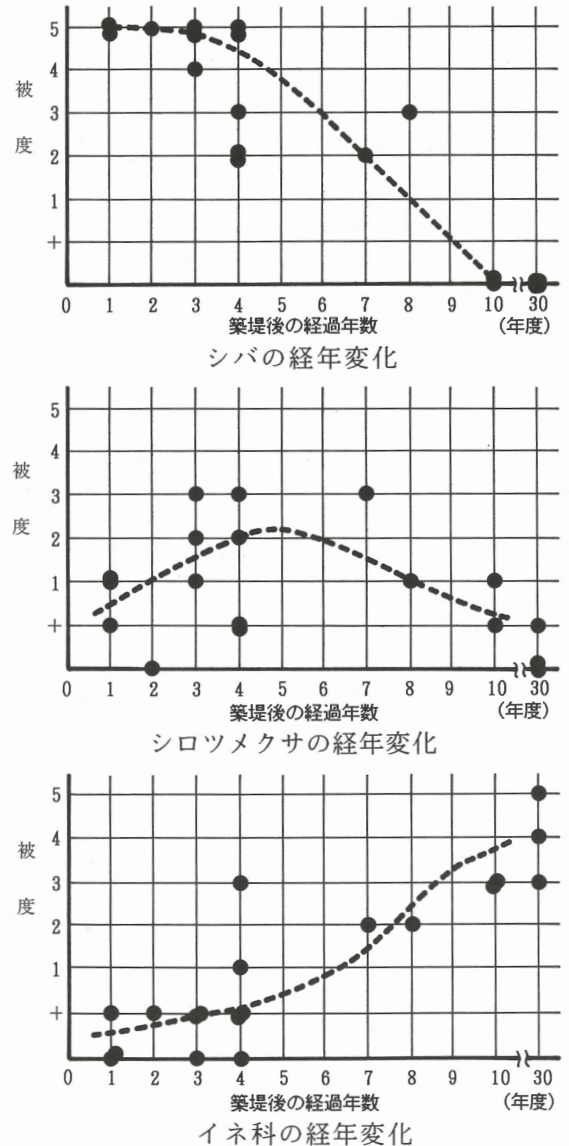


図-1 堤防植生の築堤からの遷移

りが必要としている。草刈りは芝の根毛の成長を促すとともに、侵入種の茎丈を抑え芝の光の確保を容易にするが、草刈りには膨大な費用が掛かることから十分な草刈りを行う事ができないことも多い。特に長い河川管理延長を有する県区域においては、費用の面から草刈りがほとんどできていないのが現状である。

また芝が背の高い他の植生に遷移した場合、根が株化しその結果植生間に地面が露出する場合も多いが、この場合はその根毛で覆われていない部分が流水により容易に侵食を受けて堤防全体の弱点箇所となる。つまり植生による堤防の被覆を考える場合、芝から株化する植生への遷移の他、様々な形で発生すると思われる弱点箇所をどうやって補ってゆくかが重要なポイントとなる。

### 3. 土や砂の耐侵食性

このように堤防を植生芝群落で被覆することは堤防の機能維持のうえからも、又景観及び生態環境の面からも求められているものの、実際堤防に働く流水の力や土や植生の流水に対する耐侵食性がどの程度かについては十分な検討がなされていない。このため、まず土や植生の流水に対する耐侵食性について良く見極めておく必要がある。

土木研究所では、過去に近隣の河川の粘性土を突き固めた盛土の供試体を使って、「高速流侵食試験装置」を用いた耐侵食実験を行い、流速と土の侵食速度の関係を評価している(図-2)。これによると、一般に粘性を有する土は粘土含有量、堆積環境(自然堆積と堤防のような人工盛土)の違いや湿潤状態から生ずる土の密度や構造の違いによって耐侵食性に大きなばらつきが生じるが、そのうち関東ロームを主体とした高水敷から採取した供試体の場合は、流速が1m/s以下でも侵食が始まり、その侵食深は

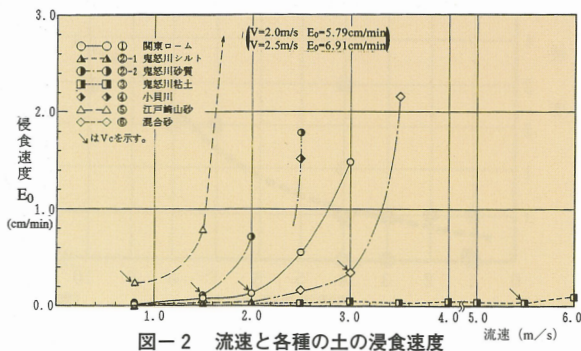


図-2 流速と各種の土の侵食速度

通水時間に概ね比例している。その程度の流速では流速の増大に対する侵食深の増大率はあまり大きくならないが、流速が2m/s程度になると侵食深の増大は急激に大きくなっていく事が分かる(図-3)。

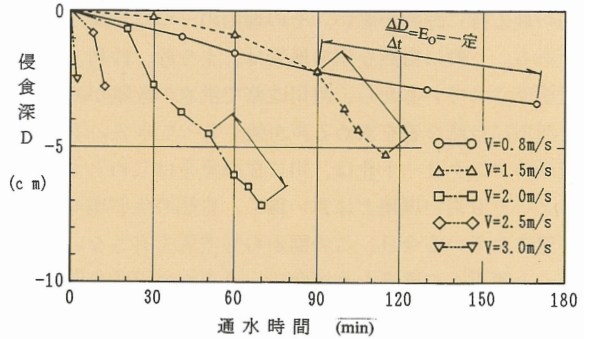


図-3 関東ローム層の流速と侵食深の関係

ところで、洪水時に堤防法尻付近ではどのくらいの流速が生じているのであろうか。例として比較的大きな河川の下流部における複断面河道の直線部分で計画高水位相当の洪水が生じた場合の流速を考えてみる。水深;  $H = 4\text{m}$ 、河床勾配;  $I = 1/2600$ 、高水敷の粗度 ( $n$ ) を0.025と設定し、十分広い高水敷があり低水路からの運動量輸送がない場合を考えると、以下の計算より流速は概ね1m/sとなる。

- ① 高水敷の平均流速;

$$V_m = 1/n \cdot H^{2/3} \cdot I^{1/2} = 1.98\text{m/s}$$

- ② 摩擦速度;

$$U_* = \sqrt{g \cdot H \cdot I} = 0.12\text{m/s}$$

- ③ 平均流速公式は、以下のようになり(1)、(2)より $ks$ は0.06となる

$$V_m / U_* = 6.0 + 5.75(\log H / ks)$$

( $ks$ は相当粗度)

ここで、水深 ( $h$ ) 方向の流速分布を対数則分布として以下の式を考えると

$$V(h) = U_* \times \{8.5 + 5.75 \log(h / ks)\}$$

( $h$ は高水敷高を0とした場合の水深)

これより、堤防法尻付近 ( $h = 0.06\text{m}$ として)での流速は

$$V(h = 0.06) = 1.02\text{m/s}$$

となり概ね1m/sである。

上述したように、粘性土の場合流水に対する侵食速度は様々な値を示すが、関東ロームで見た場合侵食は流速1

m/s 以下でも始まっており、計画高水位相当の洪水に対して堤防を粘性土のみで防護することはあまり期待できないと考えた方がよい。つまり土だけの覆土を行う場合には、少なくとも河川勾配が緩い等上述より条件の良いところに限定すべきであろう。

一方、純粋な砂のみの耐侵食性を考える場合は図-2でも分かるとおり粘性土に対して耐侵食性は低い。ちなみに流水により砂粒子が受ける抗力とそれに抵抗する慣性力の比で砂の移動性を評価する「無次元掃流力」の値を用いて土の耐侵食性を評価してみる。無次元掃流力 ( $\tau_*$ ) は以下のように書くことができ、

$$\tau_* = u_*^2 / sgd = H \cdot I / s \cdot d$$

$$u_* = \sqrt{\tau / \rho} = \sqrt{g \cdot H \cdot I}$$

s ; 粒子の水中比重、g ; 重力加速度、d ; 砂の粒径

ここで砂の移動限界である無次元掃流力は概ね0.05であるので、これにより砂の平均粒径を求めると砂の移動限界、つまり侵食限界での粒径は、概ね1.9cmの砂利又は礫となってしまう砂を用いた堤防覆土は困難と考えられる。(砂が覆土の斜面上にあるため、斜面角と砂の水中安息角を仮定し補正すると、実際にはこれよりさらに大きい物が必要)

このように上記のような河川において計画高水位相当の洪水が生じた場合、相当緩い河床勾配の区間など流速のかなり遅い区域でない限り、砂はむろんのこと粘性土でも流水の侵食に対抗することは難しく、その表面を植生等で覆い耐侵食性を高める方策が必要となる。

#### 4. 植生の耐侵食性

植生の耐侵食性についても上記と同様の実験を行っている(図-4)。この実験では各流速ごとに30分以上の通水時間を与え侵食深を測っているが、これによると、一様に生えそろうている芝 (Case-1A、1B) の場合、流水に対する耐侵食性は想像以上に高く、流速 5 m/s を超えてもその侵食深は 1 cm 程度でそれ以上はほとんど進まない。また流速 5 m/s を 1200 分通水した長時間通水ケース (Case-A) でもあまり侵食が進行していないのが分かる。

また芝の実験において、平均 20 cm の草丈を持つ芝 (葉を有する; Case-1A) と葉を刈り込んだ芝 (葉が無く、根のみ; Case-1B) での耐侵食実験を同図で比較してみると、前者の侵食深の差異はほとんどないことが分かる。この結果によれば、一般に植生の耐侵食性は根毛及び地下茎によ

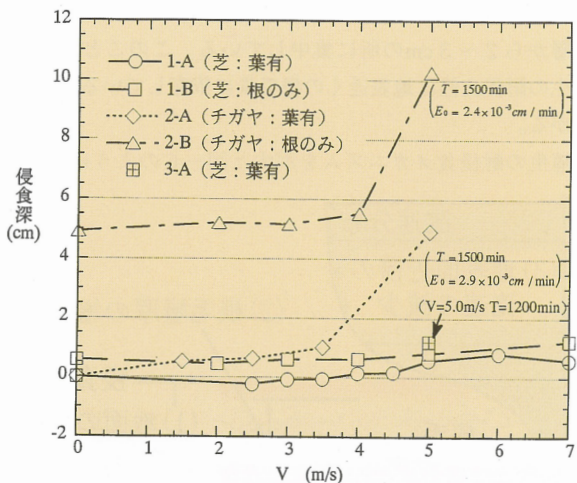


図-4 芝とチガヤの流速に対する侵食深の関係

って堤体土の表面が覆われることで発揮されていると考えられ、この場合葉の耐侵食性は評価できるほど大きくないものと考えられる。

また堤防に良く生えているチガヤ被覆の供試体と芝被覆の供試体の耐侵食性を比べてみると (Case-1A、1B)、芝の場合上述したように流速 5 m/s 又はそれ以上でも侵食はほとんど進まないのに対して、チガヤの場合、流速 3 m/s では芝と同様侵食深が約 1 cm にとどまるが、5 m/s 程度になると急激に侵食が進む。深さ方向の芝とチガヤの単位体積当たり根毛量の違いを図-5に示すが、芝

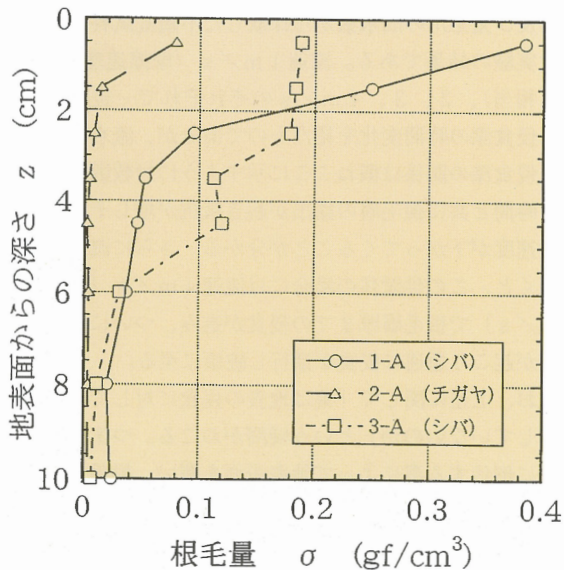


図-5 芝とチガヤの深さ方向の根毛量

はチガヤに比べて根が細いうえ根毛量が多く、その根毛は表層から2～3cmの所に集中している。このことから植生の耐侵食性は地表近くの根毛量に依存していることが分かる。

植生の耐侵食メカニズムを示すと図-6のようになる。

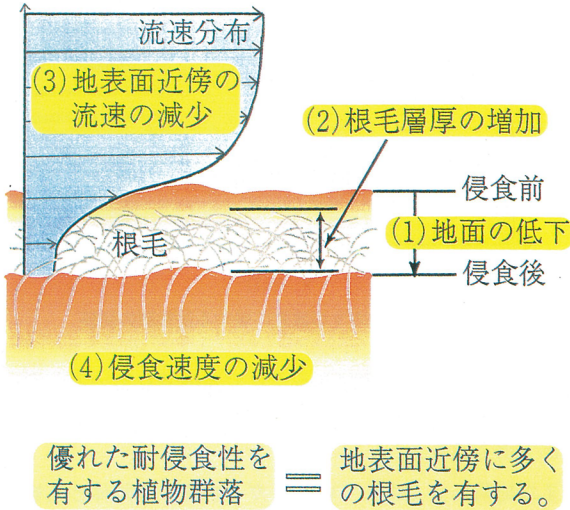
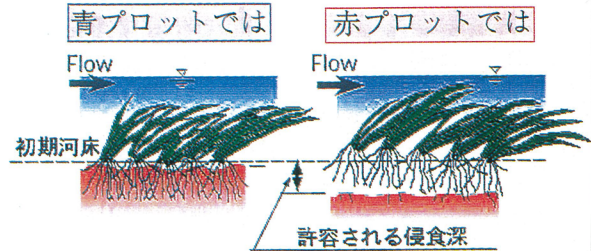
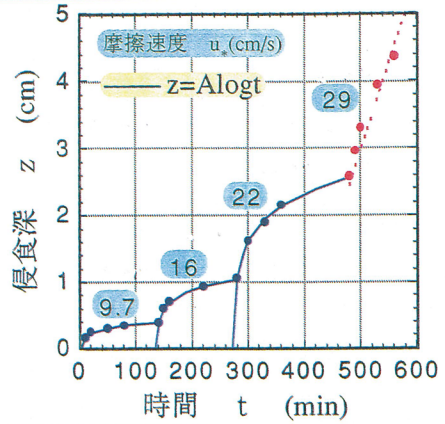


図-6 植生の耐侵食メカニズム

水深方向の流速は地表面近くになるとその抵抗で急激に小さくなるが、根毛層内では根毛や地下茎の流水抵抗によってさらにその傾向が顕著になり、根毛層の下の地表面での侵食を大きく減じる事となる。図-7は、利根川の支川小貝川及び鬼怒川の高水敷から採取した不攪乱試料を用いた侵食実験の結果である。流速1m/s（摩擦速度9.7m/sに相当）、2、3、4m/sのそれぞれで一定時間水を流し侵食深の時間変化を見たものであるが、流水の通水時間と侵食深の関係は概ねここに示すように対数則分布を示し、時間と共に根毛層の露出が起き抵抗が増しそれと共に侵食速度が下がってくる事が分かる。さらに流速を増してゆくと、この供試体の場合には流速4m/s（摩擦速度29m/s）で根毛層厚までの侵食が進み、ついには植生の剥離が起り急速に侵食が進行し破壊に至る。

なお、上述に関して「葉は地表の侵食に対して全く機能を有していないのか」という疑問がおこる。つまり葉は洪水時に倒伏する事によって地表表面を覆い、根毛よりも地表面の流速を低減させるのではないかという想定であるが、通水中の葉の観測によると葉は倒伏して地表面とほぼ並行を保つものの地表近くには薄い乱流境界層が形成さ

・耐侵食性の特徴



局所的な植生の剥離

図-7 通水時間による浸食深の変化

れ、流れの作用を受けて振動し、通水中は隣り合う葉の間に水が流れる為の空隙が生じてしまう。このため流速低減効果が根毛層に比べると非常に小さいものになっていると考えられる。一方、洪水後に高水敷上を見てみると、洪水時には河床に堆積しえないウォッシュロードとして挙動する大量の粒子の細かいシルトが薄く溜まっていることがよく確認される。このことを合わせ考えると、耐侵食性の面から考えた葉の流速低減効果は小さいものの、少なくとも多少の流水低減効果は有しており、それによって通常その地点では堆積しえないようなシルトが溜まるものと推察される。

5. 十分な耐侵食性を有する植生被覆工法の開発

このように植生の耐侵食性、特に一様に生えている芝には大きな耐侵食性が期待できるが、芝に耐侵食性があると言ってもそれは一様に生えそろうた芝、つまり根毛が均一に地表近くに存在するような十分管理された状態の芝の場合である。前述したように、一般に堤防は年月と共にモグラの穴や車の轍等人為的な窪みができる可能性がある他

背が高く株化して根毛の少ない他の植生に「遷移」してしまう事によってその間が裸地となる場合が多い。弱点は一カ所でもあれば、そこを始めとして全体に侵食が進んでいく事になるため、植生により堤防を防御しようとするれば、耐侵食性の確保のために草刈りを頻繁にやらなければならない他、雑草の抜根、窪みの穴埋め等、相当な維持・管理労力が必要となり、護岸の代用をさせようとする植生が十分育つまでの間に受けるかもしれない流水外力への対応や、植生面全体の耐侵食性を支配する弱点箇所をどうやってカバーするか等、通常の維持管理水準でこの状態を保つのはかなり難しいと思える。

このようなことから、流水による侵食を防止しつつ芝の繁茂を両立させる部材（シート材）の開発が必要となっている。このシート材の持つべき特性は、まず第一に根が通過できる空隙を有していることである。開発されたシートの上には環境上植生の繁茂が必要であり、そのためには根がシートを通過してその下の地面に十分活着している事が必要である。またそのためにはシート材の厚さが植生の根がシートを通過してその下の地盤に定着できる厚さ以下であることが必要である。一方、シートは根毛層のようにある程度の密な空隙を有し、そのシート材の内部で流速を減少させ、その下の土砂に対する剪断力を小さくすることができる必要がある。このようなものに近いものとして、従来開発されたジオテキスタイルがある。ジオテキスタイルは厚さは薄く、通水性を有するが、土砂流出の防止をその目的としているために芝の根を通す程の十分な空隙を有していない。このため、上述したようにある程度の空隙を有して根の通過を許容すると同時に、そのシート内で流速を減じ地面に対する流水の侵食を抑制しうるシート材の開発が望まれる。

## 6. おわりに

今後、環境面からはさらに早い流速が作用する河岸等の侵食防止対策としても植生の利用が求められると思われる。また同時に、超過洪水による越水に対しても環境面からは堤防被覆としての植生の利用が求められるであろう。堤防の裏法面に十分な耐侵食性を有する植生被覆が可能であれば、越流量がある程度以下であれば植生被覆による越流水に対する侵食防止が可能であろう。堤防は一且破堤した場合には大量の水が溢れ人命・財産を奪うこと

になるが、超過洪水に対しても堤防の破堤さえ免れればその被害は大幅に低減できることになる。

また21世紀の高齢化社会に向け維持管理コストの削減が望まれる中、堤防においても草刈り費等があまり掛からない維持管理が望まれているが、強い耐侵食性を有するとともに堤防の他の雑草の根の成長を抑制し、芝の良好な成長のみを促進する機能を有するシートが併せて開発されれば将来の河川管理上大いに有用である。このようなことから現在その研究・開発に取り組んでいるところである。

### (参考文献)

1. 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（佐々木他） 水理講演会、1993
2. 河川環境整備に関する調査河川植生に関する調査 建設省四国技術事務所、1993
3. 沖積河川学（山本晃一 著） 山海堂、1994
4. 堤防のり面の耐侵食強度評価実験（佐々木他） 土木学会第49回年次学術講演会、1994
5. 植生の遷移と堤防の管理（北川 他） 水工学論文集 第39巻、1995
6. 粘性土の耐侵食性評価法の比較 土木学会第51回年次学術講演会、1996
7. 侵食防止・植生繁茂を両立させるシート材の持つべき基本特性（堀 他） 土木学会第51回年次学術講演会、1996
8. 根毛層が発揮する耐侵食性の評価方法（服部 他） 土木学会第51回年次学術講演会、1996

