

論文 植生ポーラスコンクリートブロックの流水抵抗に関する研究

堀口 剛*¹・菅 和利*²・伊藤弘樹*³・岡本享久*⁴

要旨：ポーラスコンクリートブロックに植栽した緑化コンクリートブロックを河川護岸の強化と堤防緑化の2つの目的に使用する場合の、流水に対する優れた耐侵食性を明らかにした。植生を伴う流れでは、植物の存在によって流れの構造が変化し、これによって河床に働くせん断力（掃流力）が変化して耐侵食性を発揮する。せん断応力の大部分が葉面で消費されるため、ブロック表面の洗掘はほとんど生じない。また、植物は土壌材を充填した空隙にしっかりと根を張り、自然土壌にまで伸びた根によって地盤とブロックが一体化し、自然な植生状態の回復と大きな護岸効果を発揮することが期待できる。

キーワード：ポーラスコンクリート、植生ブロック、Reynolds応力、摩擦速度、流水抵抗

1. はじめに

近年人々の河川環境に関する関心は多様化しており、河川の治水安全度を高める為の堤防の強化、自然環境の保全と水辺の親水性向上のための緩傾斜堤防の築堤などが実施されている。この場合、治水安全度と親水性の調和が重要な課題であり、堤防の強化と自然植生、生態系保全を兼ね備えた工法の一つとしてポーラスコンクリートブロックを用いた緑化コンクリート工法が考えられる。ポーラスコンクリートの空隙部分に植生の育成を促進する土壌材を充填し、表面に客土と共に植物の種子あるいは苗を植え付けると、植物はこの充填剤の中に根を延ばし、最終的にはブロック下の自然土壌にまで根を張ることになる。この植生ブロックを自然土壌の上に設置することにより、堤防表面を流水による侵食から防止すると共に、緑化による修景、長い時間スケールでの自然な生態の復元を目指すことができる[1]。本研究では、植生ブロックを流れの中に設置した場合の抵抗、流れの様子についての基礎的な研究を行ったものである。

2. 実験の方法

植物の流れに対する抵抗性、すなわち、どの程度の強さの流れまで植物がポーラスブロックから剥がれないか、植物の根元の土が洗掘されて根がちぎれないかの限界水理量の決定を目指した基礎的な研究である。植生ブロック上の流れでは、植物の根、茎、葉が表土を覆い、耐侵食性を発揮すると考えられる。しかし、植物の存在に伴って流れの構造が変化し、これによって河床に働くせん断力（掃流力）が変化して耐侵食性を発揮すると考えることとする。そこで、流れの構造の変化を検討するために、流速分布、乱れ強さの測定を行った。また、河床に働くせん断力を変化させて、植生ブロックの流れへの抵抗性についての実験データを整理した。

実験で用いたポーラスコンクリートブロックの物性を表-1に示す。ポーラスコンクリートを40cm x 40cm、厚さ10cmの平板に成型し、土壌材を充填した後、表面にリードカナリー、チガヤを植栽した。実験時の植生密度及び植生高さはリードカナリーではそれぞれ70%及び15cm、チガヤではそれぞれ10%及び60cmであった。植生ブロックを水路底に設置して実験を行った。実験で用いた水路は、水

*1 ジャグラス (株) 専務取締役 (正会員)

*2 芝浦工業大学助教授, 工学部土木工学科

*3 日本セメント (株) 中央研究所 (正会員) *4 日本セメント (株) 中央研究所 主席研究員, 工博 (正会員)

路幅0.6m、深さ0.6m、長さ15mの片面ガラス製の可変勾配水路である。水路勾配を1/600に設定し、この水路の上流端から4m離して植生ブロックを設置した。

表-1 ポーラスコンクリートの物性

物 性		
透水係数 (cm/s)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	空隙率 (%)
2.5	210	25

植生ブロック上流には、助走区間として2mの区間にブロックと同じ厚さの発泡スチロールを敷き詰め、その下流にポーラスコンクリートブロックを40cmの区間設置した。この様子を示したのが図-1である。植生ブロックの上流端にX座標の原点を取り、下流方向を正、上流方向を負とする。植生ブロックの区間は3mを基準としたが、'94年夏の異常な暑さのために植物の育成が十分でないブロックがあった為に、植物の種類によって設置区間の長さが異なることとなった。

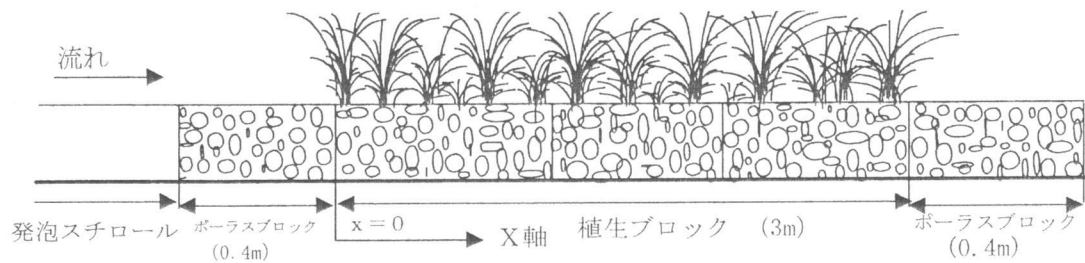


図-1 ブロック設置の模式図

植生ブロックによる実験に先立ち、ポーラスコンクリートブロックを水路床に敷き詰め流れの平衡性をチェックした。X=0.4mと2.0mでの流速分布を示したのが図-2である。流速の測定には直径3mmの小型プロペラ流速計を用い、鉛直方向に移動して分布形を求めた。X=0.4mと2.0m位置での流速分布の形はほぼ一致しており、流れがブロック上に入ると短い距離で一様になることを示している。従って、植生ブロックを設置した場合にも短い区間で流れは一様になると考えられるので、測定区間をX=0.6mより下流にした。

実験開始時には水路下流端に設けた堰板を上げて十分な水深を確保して一定流量を流し、その後堰板を下げて所定の水深で実験を行った。測定項目は水面勾配と流速分布である。水面勾配の測定にはポイントゲージを用いた。水路に水

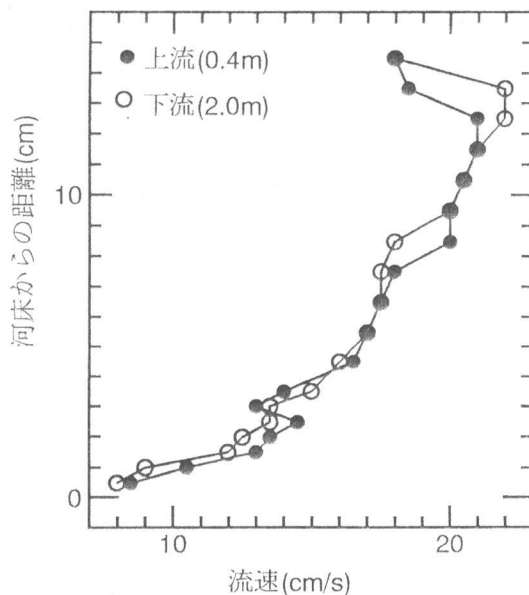


図-2 流速分布 (ポーラスコンクリート)

を張った状態で所定の2地点に設置したポイントゲージで水面での値を読み取り、流水時に同地点で水面での値を読み取ることにより、2地点のそれぞれの水平から水面までの距離を求め、その差を2点間の距離で割って水面勾配を算定した。流速分布は植生ブロック域の上流と、植生ブロック域内の2断面でプロペラ流速計を用いて鉛直分布を測定した。それぞれの実験での流速、水深の測定断面の位置（X座標の値）を示したのが表-2である。

表-2 流速、水深測定断面位置

	流速測定断面		水面勾配測定断面	
	上流断面	下流断面	上流断面	下流断面
リードカナリ	-1.0m	1.0m	0.6m	2.6m
チガヤ	-1.0m	0.8m	0.6m	2.6m

実験では一定流量に対して水深を変化させてせん断力を変化させ、流れの様子、根元の砂の移動の様子をビデオで撮影し、解析を行った。流水が植生ブロックに作用するせん断力は、流れに対しては抵抗として働く。このせん断力を変化させる目的で水深を変化させた。一定流量に対して水深を小さくすると、この流量を流すためには流速が大きくなる。開水路の流れは水面勾配によって決まっており、大きな流速を得るためには水面勾配を大きくする必要がある。河床に働くせん断応力 τ は水深が場所的に変化しない等流の場合には $\tau = \rho g R i$ で表される。ここに ρ は密度、 g は重力加速度、 R は経深、 i は河床勾配である。水路幅に比べて水深が十分に小さい場合には経深 R は水深 h で近似できる。今回の実験では水深は場所的に変化する不等流であるので、せん断力を $\tau = \rho g h I$ と慣用的に表現する。ここに I は水面勾配である。従って、実験では一定流量に対して水深を変化させて水面勾配を変化させ、結果としてせん断応力を変化させた。

3. 実験結果および考察

3. 1 乱れ強さの分布

植生を伴う流れでは、乱れ強さの鉛直分布が変化し、その結果河床に働くせん断応力が減少して耐侵食性が発揮される。チガヤの植生ブロックを設置し水を流すと、葉は流れ方向になびき、図-3のようになる。流れは葉面上を滑るように流れ、植生内では流れも遅く、流速変動も小さいことが予想される。乱れによって生じるせん断力はReynolds応力と呼ばれ $-\overline{\rho u'v'}$ で表される。ここに u' 、 v' は水平、鉛直速度変動成分である。2成分電磁流速計を用いて水平、鉛直速度変動を測定し、Reynolds応力を求め、摩擦速度 U_* で無次元表

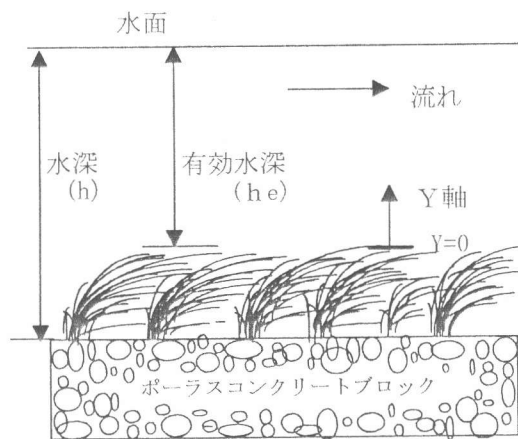


図-3 植生上の流れの様子

示したのが図-4である。摩擦速度 U_* はせん断応力 τ を速度の次元で表したもので、 $U_* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{ghI}$ で表される。しかし、せん断力は主に葉面に働くと考えられるので、葉面を見かけの底面として、葉面より上層水深を有効水深 h_e として採用し、 $U_* = \sqrt{gh_e I}$ と表すこととする。なお、有効水深はビデオ撮影した映像から決定した。図-4はReynolds応力を葉面に働くせん断応力で無次元化して表したものである。図-3に示したように、葉面上にY軸の原点を取り、上方を正とした。 $Y/h_e=0$ は葉面を、1は水面を、負の値は植生内を表す。葉面でReynolds応力が最大にな

り、植生内に入ると急激に低減する様子を表している。このように植生内で急激に乱れが低減するために、植物の根元に働く掃流力が小さくなり、侵食から底面を保護することとなる。植生密度、植生種類、植生方法などによって分布形は多少変化することが予測されるが、有効植生高でピークを有する分布形からは大きく異なることはない。Reynolds応力が植生内でかなり減少し、河床に働くせん断応力が減少して耐侵食性が表れると考えられる。

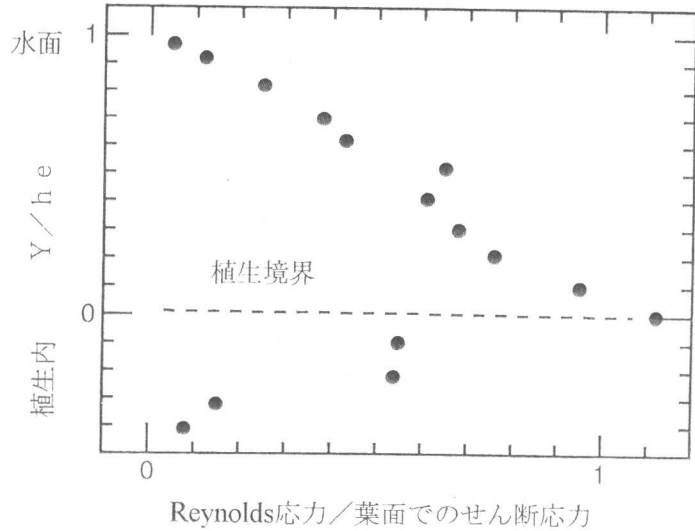


図-4 Reynolds応力の分布 (チガヤ)

3. 2 流速分布

植生ブロック区間と助走区間での流速の鉛直分布を示したのが図-5及び図-6である。

図-5はポーラスコンクリートブロックにリードカナリを植えた植生ブロックでの分布である。助走区間 (X=-1.0m) では流速分布は通常の開水路での分布形をしているが、植生ブロック区間では植生内で殆ど流速が無く、上層のみ流れがある分布形をしている。図-4でのReynolds応力の分布の結果と一致している。

図-6はポーラスコンクリートブロックにチガヤを植えた植生ブロックでの分布である。リードカナリと違いチガヤは束状になっており、その間隙の流れの強い所での流速分布を示した図である。植生内でも空間的に分布形が異なることを示しているが、植生周辺では殆ど流れの無いことは他の場合と同じである。今回は列状にチガヤを植えてあるが、もう少し長時間養生すれば密度も大きくなり、植生内全体で流速の低減が期待できる。

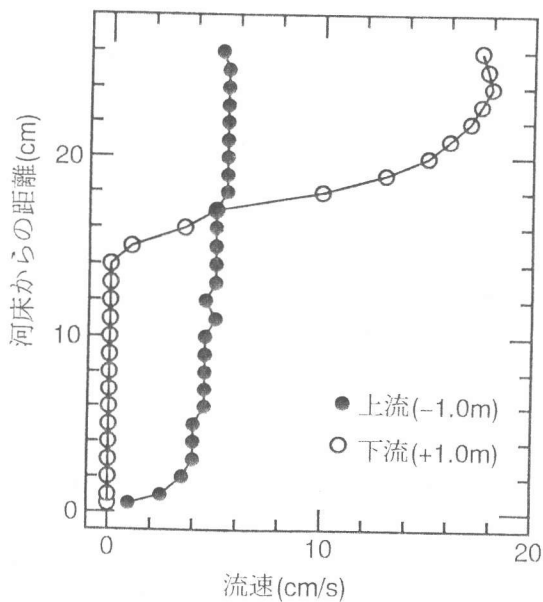


図-5 流速分布 (リードカナリ)

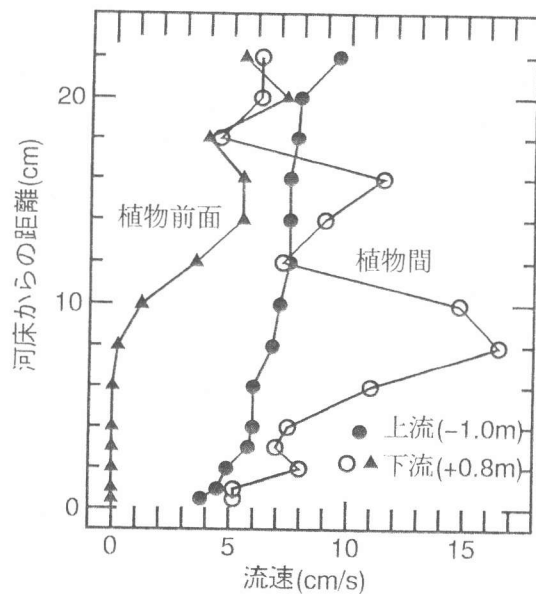


図-6 流速分布 (チガヤ)

3.3 単位幅流量と摩擦速度

一定流量に対して水深を変化させ、せん断応力を変化させる実験を色々の流量に対して実施した。ポンプ能力の制限から流量を35リッター/sしか流せられないので、実験範囲のデータ整理から大きな流量の領域での摩擦速度を推定した。

図-7~9は単位幅流量と摩擦速度との関係を両対数グラフで整理したものである。摩擦速度の算定には有効水深を用いた。なお、植生無しの場合には水深を用いた。

図-7はポーラスコンクリートブロックのみの場合と植生ブロック（チガヤ）の場合との比較を示した図である。植生ブロックの方がポーラスコンクリートブロックのみの場合に比べて摩擦速度が大きくなることを示している。

図-8及び9はポーラスコンクリートブロックにそれぞれチガヤ及びリードカナリを植栽したブロックでの単位幅流量と摩擦速度との関係を示したものである。いずれの図も一つの曲線の回りに分布し、単位幅流量の増加と共に摩擦速度が大きくなる傾向を示している。植物の種類によってその増加傾向の程度に差が見られるが、チガヤ、リードカナリの差は植生密度の差によると思われる。植生を伴う場合にはせん断力が大きく、流水抵抗性に優れ耐侵食性が十分に発揮されることを示している。単位幅流量が $1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ のときの摩擦速度をグラフから推定すると30~40cm/sの摩擦速度の値を示している。すなわち、この大きさのせん断力の大部分を葉面が分担して受け持ち、河床に作用するせん断力を低減していることを示している。

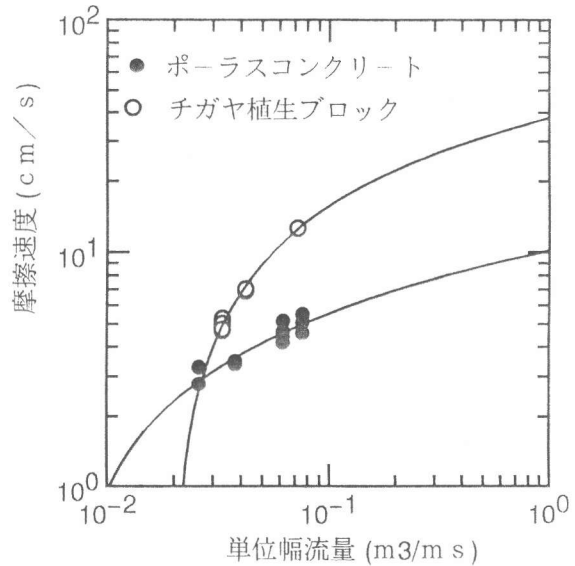


図-7 単位幅流量と摩擦速度
(ポーラスコンクリート)

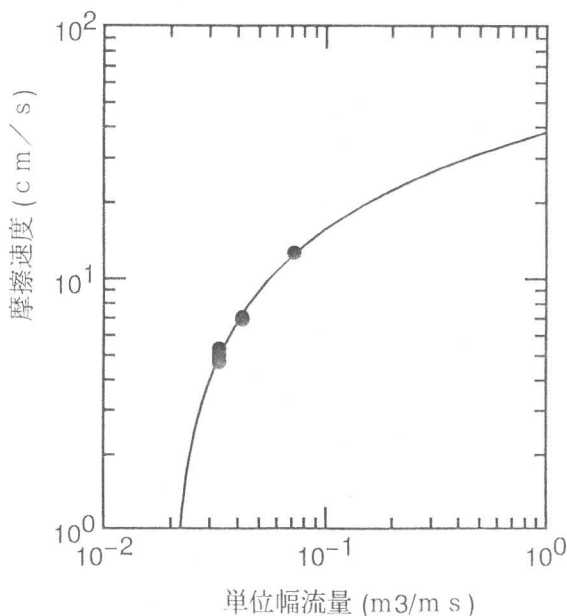


図-8 単位幅流量と摩擦速度 (チガヤ)

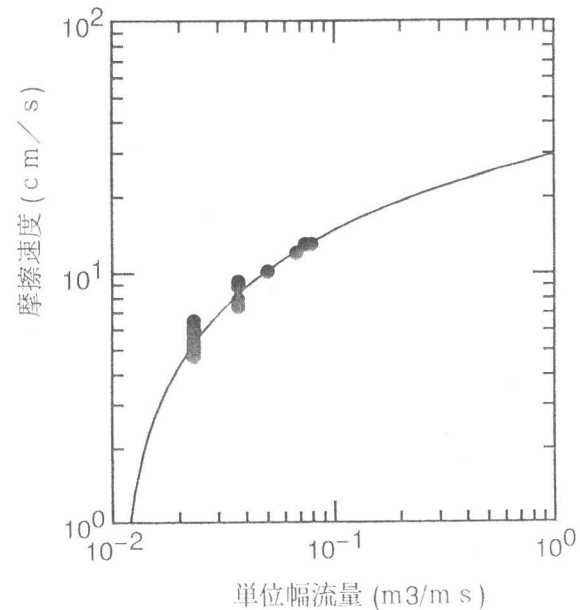


図-9 単位幅流量と摩擦速度 (リードカナリ)

3. 4 河床洗掘の可視化

ポーラスコンクリートブロックの上に客土して植物を植えている場合に、河床に働くせん断力によって砂がどのように洗掘されるか、また根が流れによって剥がれないかをビデオ撮影して検討した。写真-10はリードカナリの根元の洗掘の様子を示したものである。この写真からも分かるように、河床はなぎ倒された葉面によって覆われているためにほとんど洗掘されていない。客土した土の中に毛根が張り巡らされていて土を押さえていることも洗掘に強い一要因である。写真-11は植生ブロックの隙間に根を張った様子を示したもので、大きな根はポーラスコンクリートブロックの隙間に根を張っているために植物がブロックから剥がれることは無かった。



写真-10 リードカナリの根元の洗掘の様子 ($U=13.1\text{cm/s}$)

写真-11 チガヤの根の張り方

4. 結 論

植生ポーラスコンクリートブロックの流水への抵抗性について検討し、以下の結論が得られた。

- 1) 植生を伴う流れでは、植生内で乱れが減少し、Reynolds応力の分布が変化する。葉面上（有効水深）でReynolds応力が最大となり、水面と底面に向かって低減する三角形分布をする。特に、植生内ではReynolds応力が急激に減少し、底面に働くせん断力は極端に小さくなる。
- 2) 植生ブロックは流水に対して大きなせん断力を発生し、この分だけ堤防を保護する能力を有している。せん断応力の大部分を葉面で消費するために、植生ブロックの根元に働くせん断力は小さく、洗掘はほとんど生じない。また、毛根がブロック表面を覆うと共にポーラスブロック隙間に根が十分に伸びており、流水に対する抵抗性は優れている。
- 3) 葉面に働く摩擦速度（せん断応力）は実験の水理量の範囲では 15cm/s 程度であり、この水理量の範囲では植物根元の洗掘、植物のブロックからの剥離は生じず、植物がブロックから剥離する限界水理量の決定は出来なかった。
- 4) 洪水時を想定した単位幅流量 $1\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ では、葉面に働く摩擦速度（せん断応力）は $30\sim 40\text{cm/s}$ に達することが実験データの整理から予想された。この摩擦速度の大きさでは根元の洗掘よりも根、葉の引っ張り強さが問題となり、今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 清水晃, 安達忠治: 河川敷植生層上の流れの実験と植生層の耐侵食性の評価, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 2-A, pp. 364-365, 1994. 9