

草本類の繁茂したポーラスコンクリート護岸の 流れに対する安定性¹

Hydraulic Stability of Polous-Concrete Revetments with Tall Herbaceous Vegetation

近藤和仁²・藤田光一³・松尾和己⁴

服部 敦⁵・平舘 治⁵・渡辺 敏⁶

Kazuhito KONDO, Koh-ichi FUJITA, Kazumi MATSUO

Atsusi HATTORI, Osamu HIRATATE, Satoshi WATANABE

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、連続した多くの空隙を有する多孔質コンクリートであり、植生が繁茂できるため、多自然型河岸防御工の有力な素材として期待されている。ポーラスコンクリートの構造を図-1に示す。

従来のコンクリート護岸に覆土を施す多自然型護岸では、出水時に覆土や植生が侵食または流失しコンクリート護岸が露出する可能性がある。この場合、人為的な手当をしなければ緑化は期待できない。しかし、ポーラスコンクリート護岸では、覆土や植生が失われた場合でも、ポーラスコンクリート自体が植生基盤としての機能を有しているため、植生の復元や再生が可能である。

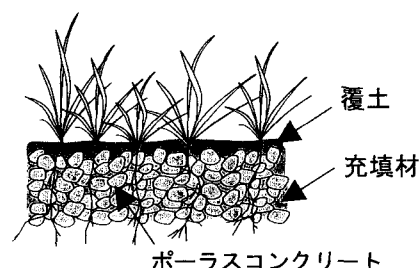


図-1 ポーラスコンクリート構造図

植生の繁茂したポーラスコンクリート護岸を扱う場合、護岸表面に作用する揚力・抗力のほかに、植生を介して働く流体力を考慮すべきであり、ポーラスコンクリートを用いた護岸を設計する上で、流水に対する安定性を与える植生の影響を把握することは重要である。

そこで、安定性評価に不可欠な植生に作用する流体力の算出法と流体力に深く関係する植生の物理諸元に関する特性を把握することを目的として、水路実験や河岸植生の現地調査を行った。その結果を用いてポーラスコンクリート護岸の安定性について検討を行った。

2. ポーラスコンクリート護岸に想定される植生状態と本研究の着目点

ポーラスコンクリート護岸には、自然河岸で多く見られる草本類や木本類などが生育可能であると考えられる。護岸に作用する流体力が植物の種類、生育状態、流れの状態によって異なるため、護岸表面の状態に応じて状態Ⅰ～Ⅳとして分類する。すなわち、施工直後または侵食を受けてポーラスコンクリート面が露出した状態Ⅰ、シバやチガヤなど比較的背が低く、やわらかい草本類が繁茂している状態Ⅱ、ヨシやオギなどの比較的草丈が高く、茎が太く堅い草本類が繁茂している状態Ⅲ、ヤナギや竹などの木本類が生育している状態Ⅳである。護岸の分類を図-2に示す。

1 キーワード：河川、護岸、ポーラスコンクリート、植生、安定性評価

2 建設省土木研究所 河川研究室 交流研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地 kondo44@pwri.go.jp)

3 同上 室長 工博

4 同上 主任研究員

5 同上 研究員

6 同上 交流研究員(現 (株)ウエスコ)

状態Ⅰでは、作用する流体力は通常のコンクリート護岸と同様であり、護岸表面の粗度要素に揚力・抗力が作用し、護岸の力学的な設計法も概ね確立されている。状態Ⅱでは、植生は流体力によって容易に変形し、流水中では倒伏変形と見なすことができ、

倒伏した植生上のせん断力から流体力を求めることができる。状態Ⅳは、近似的に幹の変形を無視できる（剛性が高い）ものを想定すると、幹を円柱に置き換えることで流体力を算出することができる。状態Ⅲでは、茎の剛性は比較的高いが、大きな葉を有しているため、流れの影響を受

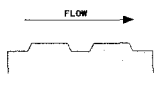
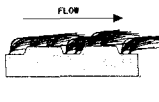
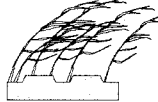
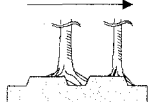
状態	(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)	(Ⅳ)
想定状態	施工直後・植生流出	草本類(低草類)繁茂	草本類(高草類)繁茂	木本類生育
表面状態	表面露出	芝、チガヤなど	ヨシ、オギなど	ヤナギ、竹など
流水中の状態				
植生の状態	---	倒伏	直立 揺み 倒伏	直立 揺み

図-2 状態Ⅰ～Ⅳ説明図

けやすい。流れの影響によって直立・たわみ・倒伏と変形し、状態ⅡとⅣの中間的な挙動を示すと考えられ、植生に作用する流体力の算出は複雑である。なお、木本類でも状態Ⅲに近い挙動を示す状況もあり得る。その時は、本研究で述べる状態Ⅲの取扱いに準じることになる。

本論では、状態Ⅲが発生しやすいヨシやオギなどが繁茂した状態を対象に、ポーラスコンクリート護岸の流れに対する安定性について検討を行うことにした。

3. 流水中の植生の変形を考慮した流体力の算定法

3.1 植生の変形に及ぼす葉の影響

葉のついていない茎に作用する流体力や流水中での変形予測の手法は、中川ほかにより示されている。しかし、ヨシやオギのように比較的大きな葉を有している場合は、流体力の算出や流水中での変形予測に、葉の影響を考慮しなければならないと考えられる。そこで、葉のついたヨシの流水中での挙動を把握するために、水路中央に葉のない茎だけのヨシと葉のついたヨシを1本だけ設置し、流水中での変形形状を測定した。実験結果を図-3に示す（プロットで表したものが実験結果）。図中の記号は、白抜きが茎だけのときの実験結果、黒塗りは葉のついた茎のときの実験結果を示している。同じ流速では、葉のない茎だけの状態と葉のついた状態では、後者の方が変形が大きく、葉の影響が無視できないことがわかる。

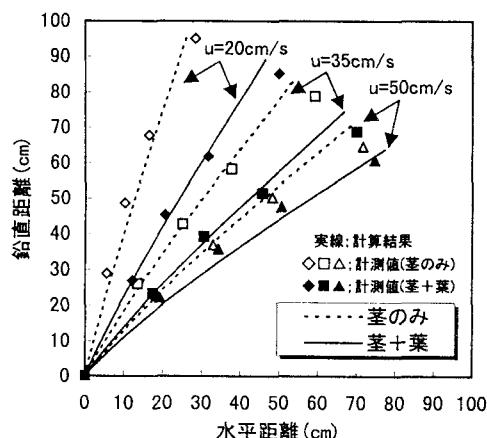


図-3 ヨシの流水中での変形形状

そこで、葉の影響を考慮した変形予測をつぎのように行った。単位高さあたりの茎に働く流体力の水平成分 F_d 、鉛直成分 F_l は中川ほかにならって(1),(2)式により求めた。

$$F_d = 1/2 \rho_w C_D D (u \cos \theta)^2 \quad (1)$$

$$F_l = 1/2 \rho_w C_D D u^2 \cos \theta \sin \theta \quad (2)$$

葉の影響は、ヨシ1本あたりの葉面に作用する水平力を F_g として(3)式で表現し、(3)式を実験に用いたヨシの葉の分布に合わせて、茎の長さに関して等分布荷重で与えた。

$$F_g = 1/2 \rho_w C_f S_{go} u^2 \quad (3)$$

ここに、 C_D :抗力係数、 D :茎径、 u :流速、 θ :倒伏角度、 C_f :葉の抵抗係数、 S_{go} :ヨシ1本あたり葉の面積である。

本論では、茎に作用する流体力の水平方向成分と葉面に作用する水平力の和を抗力、茎に作用する流体力の鉛

直方向成分を揚力と呼ぶことにする。

葉の抵抗係数 C_f は計算過程で試行錯誤的に与え、計算から得られる変形状と実験結果をフィッティングさせ、両者が概ね一致する値を採用している。 C_f と Re 数の関係を図-4に示す。 Re 数は葉の長さを代表長さとしている。同図には、福岡・藤田ら²⁾による竹の葉の抵抗係数(原文では Re 数の代表長さを茎径としているものを、ここでは葉の長さに換算して表示している)もプロットしてある。今回の実験の範囲内では、ヨシの葉の抵抗係数は(4)式で表される。

$$C_f = 1.6 \times 10^{-4} \times Re^{-1.1} \quad (4)$$

ヨシの葉の抵抗係数は竹の葉の抵抗係数よりも大きな値を示すものの、 C_f が Re 数の増加に伴い減少する傾向は共通している。抵抗係数の減少は、流速が増大するにつれ葉が流れの抵抗を受けにくい形態をとるためと考えられ、減少の度合いには葉の固さや形状、葉のつきかたが影響しているものと推察される。

ヨシに作用する流体力を、最初に述べた実験で用いたヨシのモデルを用いて、(1)~(4)式から求めた。流体力と流速の関係を図-5に示す。植生に作用する流体力は、流速の増加に伴い増大しており、また葉の存在が抗力およびモーメントに与える影響が大きいことがわかる。揚力は鉛直下向きに作用し、林ほか³⁾の模擬植生による流体力の計測結果と傾向が一致している。従来のコンクリート護岸に

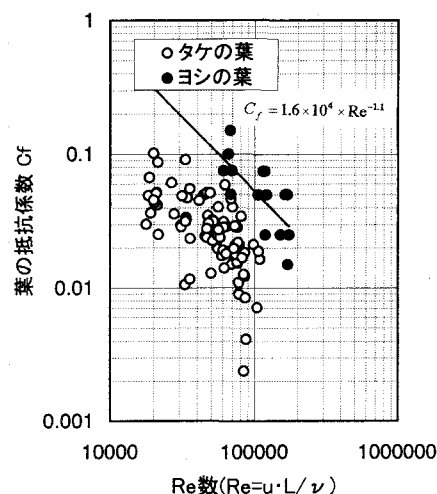


図-4 C_f と Re 数の関係

における揚力が護岸の不安定方向に作用するのに対し、植生の繁茂したポーラスコンクリート護岸では、植生に作用する揚力は護岸を安定化させる方向に働き、植生繁茂が護岸の安定性に寄与すると考えられる。

(1)~(4)式によって得られる流体力から求めたヨシの変形状を図-3に示す(実線で表したものが計算結果)。実験結果と計

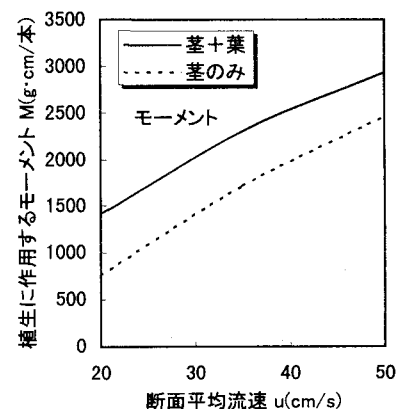
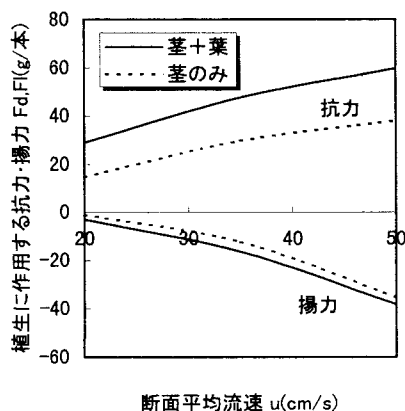


図-5 流体力と流速の関係

算結果は比較的良く一致しており、葉の影響を考慮した変形予測の妥当性を示唆するものである。

3. 2 実際のヨシ群落を対象にした流体力算出法の検証

群落中のヨシの流水中における変形が、葉の影響を考慮した植生モデルを用いて表すことができるか確認した。写真-1に示す実験水路(幅 4m、長さ 80m)の下流側 50m 区間にヨシを群生させ、流水中でのヨシの変形状況、流速、Reynolds 応力などを測定した。実験時のヨシは、平均草丈 152 (cm)、平均茎径 0.41 (cm)、平均植生密度を 61 (本/ m^2)、茎 1 本あたりに葉の枚数は 10 (枚/本)、葉の 1 枚あたりの平均表面積は 30 (cm^2 /枚)である。ヨシに作用する流体力を(1)~(4)式から求め、これらにより得られるヨシの変形高と、平均流速および Reynolds 応力の実測値を図-6に示す。変形後のヨシの高さは、平均流速の変曲点および Reynolds 応力の最大値とほぼ一致しており、葉の影響を考慮したヨシの計算モデルは群落でも適用可能であることがわかる。

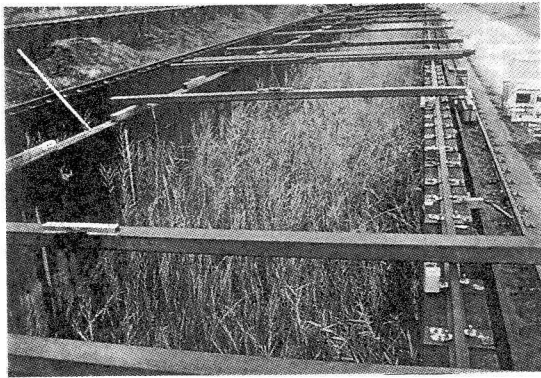


写真-1 実験状況

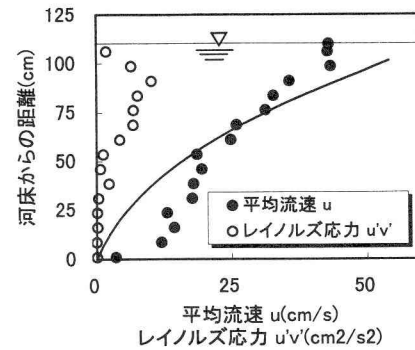


図-6 流速, Reynolds 応力と変形の関係

4. 植生に作用する流体力の算出に必要な植生諸元の設定法

植生に作用する流体力を算出するには、茎の曲げ剛性と根本のバネ定数、茎の径、草丈、植生密度、葉の面積が必要である。一方、これらの間にはアロメトリ（相対成長）⁴⁾と呼ばれる有意な相関があるといわれている。相関性を用いることで、ヨシの形状特性が簡単な指標により表されるか検証をおこなった。

茎の曲げ剛性と根本のバネ定数は、茎に荷重を加えることによって、茎を変形させ、それぞれ荷重とたわみ量および荷重と根本の変形角度から求めた。茎の曲げ剛性と茎径、根本のバネ定数と茎径の関係を図-7、図-8に示す。曲げ剛性およびバネ定数は、茎径を用いて表すことが可能であり、次式のように近似できる。

$$EI = 4.6 \times 10^6 \times d^4 \quad (5)$$

$$K = 7.6 \times 10^4 \times d^4 \text{ (小貝川)} \quad (6a)$$

$$K = 4.3 \times 10^5 \times d^5 \text{ (利根川)} \quad (6b)$$

ここで、EI は(gf・cm²)、K は(gf・cm/rad)、d は(cm)の単位である。

次に、現地における植生形状調査の結果を図-9に示す。草丈またはレンジごとの植生密度が茎径や葉の面積と比較的良好な相関関係を持つことがわかり、草丈と植生密度から葉の面積を想定できると判断できる。茎径は、草丈と相関関係があり、草丈から想定可能である。

以上から、草丈と植生密度を指標とでき、草丈と植生密度を設定できれば、流体力を算出するために必要な他のパラメータを想定することが可能である。

5. ポーラスコンクリート護岸の流れに対する安定性の特徴

ここでは、河川で多く見られるヨシの生育状態を想定し、ポーラスコンクリート護岸の流れに対する安定性の検討を行う。ヨシの生育状態は、草丈と植生密度を指標にして想定する。指標値は、草丈が 200～300(cm)、植生密度が 25～100(本/m²)の範囲の中から、①草丈・植生密度が低い（密生度が低い）、②草丈・植生密度が標準的（密生度が標準的）、③草丈・植生密度が高い（密生度が高い）状態の3ケースとし

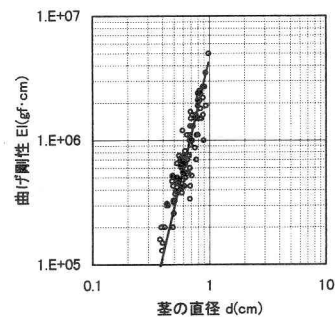


図-7 ヨシの曲げ剛性

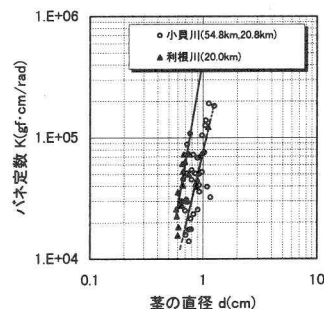


図-8 ヨシのバネ定数

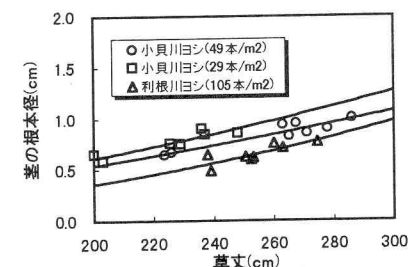
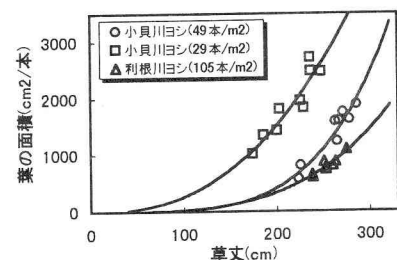


図-9 ヨシの形状特性

た。その他の植生諸元は、4章の結果を用いることで、表-1のように想定することができる。

ポーラスコンクリート護岸の安定性は、流体力の作用に対し安定性を確保できる護岸厚さによって評価する。

護岸の厚さは、一般的な計算手法⁵⁾から求めている。植生を有する流れ場では、流速は非植生領域から植生領域に流入すると、植生が粗度として働き、流速が急激に低減する。植生粗度による流速の低減効果を見込むことは、流体力を過小評価してしまうことになり、護岸の安定性にとって危険側の評価となる。よって、流体力の算出に用いる流速は、非植生領域での平均流速を用いている。

表-1 植生生育状態の想定

設	密 生 度	低い	標準的	高い
定	植生密度(本/m ²)	25	50	100
↑	草 丈 (cm)	200	250	300
想	平均茎径 (cm)	0.53	0.60	0.77
定	根 本 径 (cm)	0.66	0.76	1.02
↓	葉の面積(m ² /本)	0.15	0.12	0.17
	葉の長さ (m)	0.50	0.48	0.52

植生に作用する流体力に対して安定する護岸厚さと流速の関係を図-10に示す。図中で、○印は、流速がそれ以上速くなると、植生が倒伏する可能性があることを表している。実線は転動（回転）、破線は滑動（滑り）に対して安定する厚さを示している。同図には、状態Ⅲの護岸の安定性と比較するために、従来のコンクリート護岸で使われている平張りブロック⁶⁾ ($C_D=0.7, C_L=0.1, K_s=4\text{cm}$)、同一形状のポーラスコンクリートブロック（状態Ⅰ）が安定する護岸厚さ、および剛性の高い木本類（幹径 10cm、高さ 3m、単純な円柱形状を想定している）が生育している場合（状態Ⅳ）に安定する護岸厚さも示している。護岸ののり勾配は2割（26.6°）としている。状態Ⅲでは、作用する流体力と安定する護岸厚さの比は、護岸上に草本類が一樣に繁茂しているため、護岸の敷設面積の大小に影響されない。よって、ここでは護岸の敷設面積を 1m^2 ($1\text{m} \times 1\text{m}$) として計算している。一方、木本類は、生育本数が少なく、局所的に生えるため、敷設面積あたりの生育本数によって護岸の安定性が異なる。そのため、状態Ⅳでは、敷設面積が 1m^2 ($1\text{m} \times 1\text{m}$) と 0.25m^2 ($0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$) の二種類として、これに木本が一本生えているものとして計算を行っている。

従来の平張りブロック護岸や同一形状のポーラスコンクリートブロックによる護岸（状態Ⅰ）では、安定する護岸厚さが、流速の2乗に比例して大きくなる。通常、滑動に比べて転動に対する安定性ははるかに高く⁶⁾、想定される最大の流速によって滑動に対して安定する護岸厚さが得られる。ところが、本論で対象としている比較的背の高いヨシに代表される草本類が繁茂したポーラスコンクリート護岸が、流体力に対して安定する護岸厚さには、次のような特徴があげられる。密生度が高いほど、植生が受ける流体力も大きくなり、安定する護岸厚さが大きくなる。密生度が高ければ、転動に比べて滑動の安定性が高い。逆に密生度が低ければ、滑動に比べて転動の安定性が高くなる。安定する護岸厚さは、流速の増大に伴い大きくなり、極大値を示した後に、重力方向に働く揚力の効果によって、護岸厚さが減少する傾向を示す。密生度が高いほど、倒伏に至る流速は大きく、概ね安定する護岸厚さが極大値を示す付近の流速で倒伏する。

これらの特徴から、倒伏する前は、最も密生度が高い状態で、転動に対して安定する護岸厚さが必要となる。倒伏した後は、植生が護岸表面を覆って、護岸に作用する流体力は、状態Ⅰに類似した状態となる。この場合、想定される最大の流速によって、滑動に対して安定する護岸厚さを必要とする。すなわち、

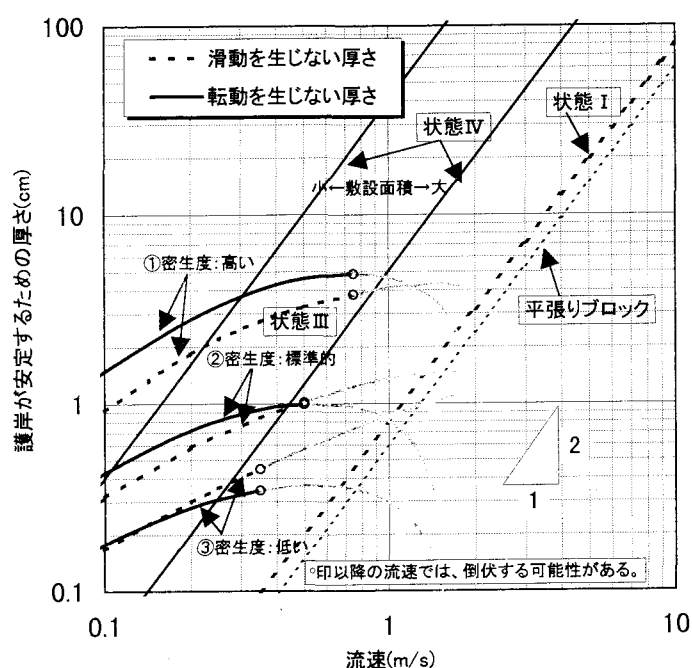


図-10 流速と護岸厚さの関係

植生が繁茂している護岸が安定する護岸厚さは、植生の倒伏前に極大値を有するため、植生の倒伏前後で安定性を判断しなければならない。

状態Ⅲの護岸厚さが極大値を示すときの流速は、植生の形状や力学的特性により異なると思われる。ポーラスコンクリート護岸の安定性を評価する上で、植生の形状や力学的特性に応じた、この流速を把握しておく必要がある。しかし、ヨシは状態Ⅲの代表的な植生であり、ヨシに対して安定する最大の護岸厚さ確保しておけば、流れの影響に対して安定すると考えられる。

植生が繁茂している護岸は、植生のない護岸（状態Ⅰ）と比較して、安定性が低下（厚い護岸を必要とする）する。しかし、それを補うために必要となる護岸厚さは比較的小さいため、草本類の繁茂が直ちに危険な状態とはならない。よって、護岸の安定性に対して、草本類の繁茂はそれほど影響しないと判断できる。

木本類が生育している状態Ⅳが安定する護岸厚さは、コンクリート護岸や状態Ⅰと同様に流速の2乗に比例して大きくなっている。この場合、護岸を不安定にする傾向がみられ、特に、敷設面積が小さいほど護岸の安定性は大幅に低下する。木本類を生育させる場合は敷設面積を大きくしたり、根系が背後地盤に定着できる構造にするなどの配慮が必要である。

6. まとめ

比較的背の高い草本類の繁茂したポーラスコンクリート護岸の流れに対する安定性に関して以下の知見を得た。

- (1)ヨシのような比較的背の高い草本類の場合、植生の変形モデルに葉の影響を含む必要があり、これによって植生に作用する流体力実用上十分な精度で算出できる。
- (2)草丈と植生密度を指標化することで、植生の特性値を想定することが可能である。
- (3)(1),(2)の成果を用いることで、ヨシのような比較的背の高い草本類を対象にしたポーラスコンクリート護岸の安定性の評価が可能となった。
- (4)植生が繁茂している護岸が安定する護岸厚さは、植生の倒伏前で極大値をもつ。
- (5)植生が繁茂している護岸では、植生のない護岸と比較して安定性が低下するものの、これにより必要となる護岸厚は小さく、草本類の繁茂が護岸の安定性に与える影響は少ないと判断できる。しかし、剛性の高い幹を有する木本類が生育すると護岸の安定性は大幅に低下する。
- (6)以上を総括し、草本類の繁茂するポーラスコンクリート護岸の安定性評価に対する基本的な考え方を示した。

謝辞:本文を執筆するにあたり、御指導していただいた望月熊本工事事務所長(前河川研究室長)、現地調査・データ処理に協力していただいた中央大学大学院松本浩志氏、永島健氏に深く感謝の意を表します。

参考文献:

- 1) 中川・辻本・北村・藤井：流れによって変形する植生粗度の抵抗則、水工学論文集、第39巻、pp.465～470、1995.
- 2) 福岡・藤田：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、土木研究所報告、第180号-3、pp.129～192、1990.
- 3) 林・滝・重村：開水路中に設置された植生模型に作用する流体力の計測、土木学会第52回年次講演会、pp.588～589、1997.
- 4) 築地書館：生態学辞典、pp.231.
- 5) (財)国土開発技術センター：護岸の力学設計法、pp.5-17～5-43、1997.
- 6) 福岡・藤田・森田：護岸法覆工の水理設計法に関する研究、土木研究所資料、第2635号、pp.15～45、1988.
- 7) 菅・堀口・垂：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、水工学論文集、第40巻、pp.1009～1014、1996.2