

寒冷地における河川堤防法面植生に関する 水理実験による耐侵食性評価

EVALUATION OF EROSION RESISTANCE BY HYDRAULIC EXPERIMENTS ON EMBANKMENT VEGETATION IN COLD REGIONS

加藤 一夫¹・村上 泰啓²・谷瀬 敦³・中村 大⁴・中陣 実咲希⁵・
佐々木 寿史⁶・サムナー 圭希¹

Kazuo KATO, Yasuhiro MURAKAMI, Athushi TANISE, Dai NAKAMURA, Misaki NAKAJIN,
Hisashi SASAKI and Tamaki SUMNER

¹正会員 株式会社水工リサーチ 業務部 (〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目2-7)

²正会員 工博 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 工修 国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 (〒060-8506 札幌市中央区北2西19丁目)

⁴正会員 工博 北見工業大学准教授 社会環境系 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁵学生会員 北見工業大学博士前期過程 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁶非会員 元株式会社水工リサーチ 業務部 (〒062-0933 札幌市豊平区平岸3条3丁目2-7)

Exotic grass species that can be established in a short period of time even in cold climates have been introduced on the slopes of river embankments in Hokkaido. However, it is necessary to consider the transition to native species in order to preserve the local ecosystem. In the Civil engineering research institute for cold region, the selection and construction methods of native species applicable to greening of embankment slopes in cold regions have been clarified. On the other hand, the frequent embankment damage caused by heavy rainfall in recent years has increased the importance of qualitative strengthening of the embankment, and the vegetation on the embankment has been required to have an erosion resistance function. Therefore, prior to the introduction of native species into actual rivers, flume experiments were conducted to determine the velocity tolerance of native species compared to the conventional exotic grass species. As a result, velvet sedge showed the same root system strength and erosion characteristics as the conventional embankment vegetation, suggesting that it is a native species applicable to embankment slope revegetation.

Key Words : cold region, river bank slope greening, native species, flow resistance test, root system strength

1. はじめに

一般に盛土で築造される河川堤防の法面には、降雨や流水による侵食を防止するために芝などの植生で覆われている。

北海道の河川堤防の法面には、寒冷気候でも短期間に定着できるケンタッキブルーグラス (*Poa pratensis*) などの外来牧草種が多く導入されてきたが、地域固有の生態系を保全するためには在来種の導入を検討していく必要がある。これまで寒地土木研究所では、2011年度より恵庭市東部の千歳川漁太築堤の側帯において試験・調査

を継続して実施し、ヨシ (*Phragmites australis*)、オギ (*Miscanthus sacchariflorus*)、ビロードスゲ (*Carex miyabei*)、ヤマアワ (*Calamagrostis epigejos*)、オオヨモギ (*Artemisia vulgaris*) が堤防法面緑化に適用可能な在来種であることを明らかにしてきた^{1), 2)}。

一方、近年の豪雨に伴う堤防越水被害が頻発したことを受け、堤防の質的強化の重要性が高まっており、堤防植生にも流水に対する侵食防止機能が求められてきている。本州以南の河川堤防植生には野芝が多用されており、その耐侵食性については多くの研究事例があり、定量的な評価もされている^{3), 4)}など。しかし、寒冷地で使用されている外来牧草種や在来種の耐侵食性については未だ十

表-1 耐侵食性試験に使用する植生種

ケース	植生名	播種年月	調査区(10cm×10cm)		土試料の締固め度
			平均株数	平均草丈	
Case1	堤防芝	2018年9月	26株	36cm	81%
Case2	ヤマアワ	2018年9月	13株	57cm	78%
Case3	ビロードスゲ	2018年9月	17株	49cm	75%
Case4	堤防芝	2017年8月	25株	22cm	75%
Case5	ヤマアワ	2017年8月	10株	59cm	69%
Case6	ビロードスゲ	2017年8月	19株	46cm	79%

分には明らかにされていない。そこで本研究では、在来種の実河川への導入に先立ち、従来の外来牧草種と比較して、どの程度の流速まで耐えうるかについて、水路実験により明らかにする。また、既往の研究^{4), 5), 6)}では草本の耐侵食性を表すパラメータとして、根毛量（単位体積当りの土塊に含まれる根と茎の重量）や根系強度並びに土壌硬度との関係性が高いことが示されているので、これらを調査し耐侵食性を評価する。

2. 耐侵食試験に用いる植生の育成

耐侵食試験に用いる在来種は、長期的に主構成種となることを期待できる種として、現地試験地^{1), 2)}で群生を確認した種で、地下茎繁殖力が高く安定した群落を形成するイネ科のヤマアワとカヤツリグサ科のビロードスゲを選定した。また、同一の生育条件で耐侵食性を比較するために、外来牧草種のケンタキブルーグラス、クリーピングレッドフェスク及びハードフェスクを2:2:1の割合で混播した芝（以後、堤防芝）を準備した。

植生を育成するための鋼製ピット（以後、植生ピット）は、透水性の床面を配設しており、形状は長さ2.0m、幅0.9m、深さ0.3mである。植生ピットに充填する用土は、千歳川根志越遊水池工事で発生した土砂である。図-1に示すとおり2017年の植生ピット作成に使用した土試料は、細粒分礫まじり砂（S-FG）、2018年の土試料は礫まじり砂（S-G）に分類され、河川堤防の堤体材料に使用できる。図-2に締固め試験の結果、表-1に締固め度Dcを示す。各試験ケースにおける締固め度Dcは69～81%の値を示し、堤防の締固め度の下限值Dc=80%を下回っているケースがある。これは、締固めて作製した土試料に植物の根系が進入し、土試料が膨軟になったためと考えられる。耐侵食試験を実施するために、上記の工事発生土を植生ピットに充填し、2017年8月に3基（以後、生育2年）、2018年9月に3基（以後、生育1年）の植生ピットに3種類の種子を植付けた（表-1）。

植生ピットには1m²当り5,000本（北海道開発局の施工要領⁷⁾による堤防法面保護の観点から一般的な生育数）となるように種子を播き、耐侵食試験までの1年ないしは2年間、屋外の圃場で育成した。育成期間には適宜除

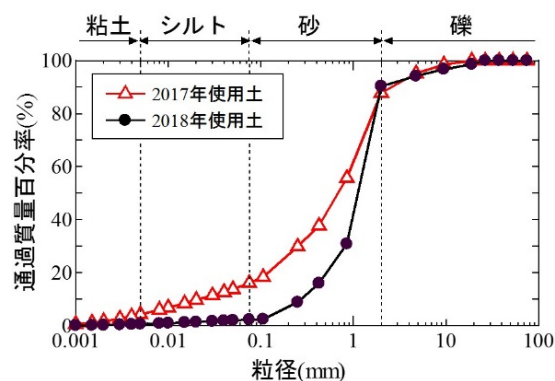


図-1 土試料の粒径加積曲線図

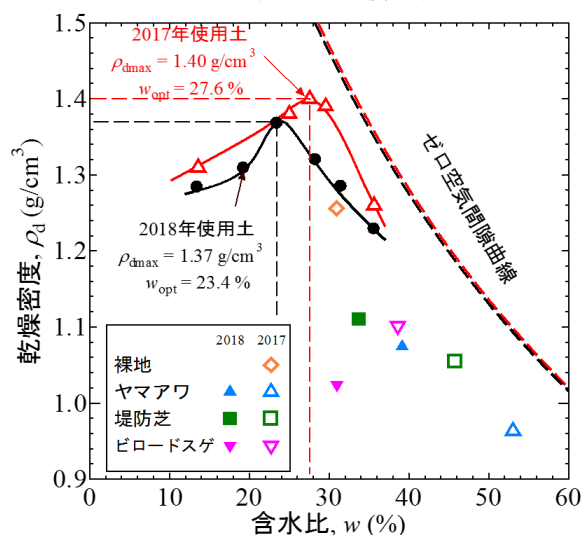


図-2 土試料の締固め曲線

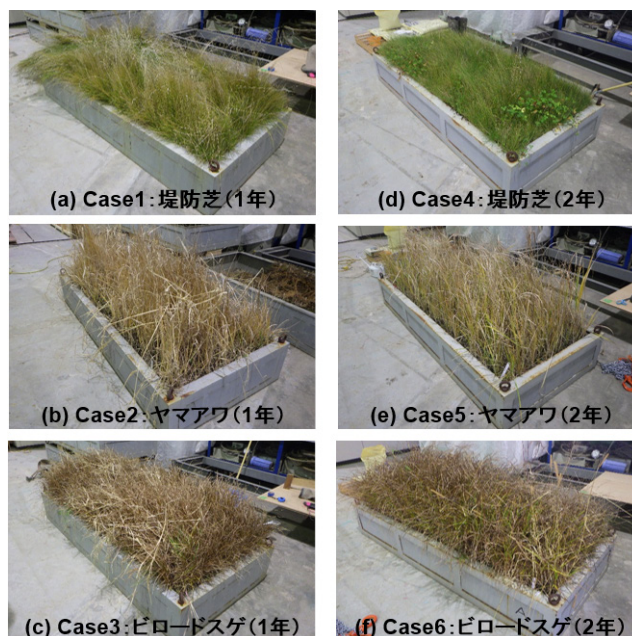


図-3 耐侵食試験に使用する植生の生育状況（試験開始前）

草、灌水を行ない、発芽状況を確認して目標本数(5,000本/m²)になるように追加播種した。なお冬季間(概ね11月～4月の間)は、養生シートを敷設し屋外で育成した。

耐侵食試験開始前には、圃場から寒地土木研究所の屋内試験施設まで植生ピットを運搬し、養生した（図-3）。



図-4 耐侵食試験装置（高速循環水路）

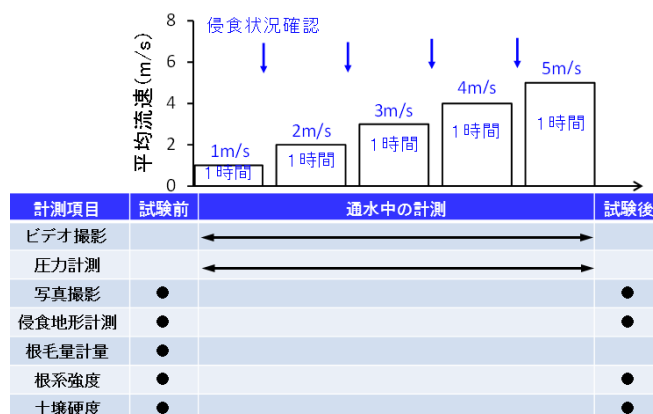


図-5 耐侵食試験の基本的な流れ

3. 耐侵食試験

(1) 試験装置の概要

試験装置は、寒地土木研究所が所有する水路幅1m、水路長25.2mの高速流れを確実に確保できる閉管路式の高速循環水路を使用した（図-4）。

植生ピットを水路中央に設置し、ピットと水路の隙間にコーキング材を充填し固定した。水路に上蓋をすると、植生を底面とする水深20cmの閉管路となる。水路側面は強化ガラス、上蓋には窓がついており試験中に侵食状況を目視で確認した他、デジタルビデオカメラを設置して流況や侵食状況を連続観察した。また、下流から5.0m、6.95m、9.05m、13.0m地点の4箇所の水路中央底面にピエゾ管を設置し、圧力センサーの測定値から植生面の摩擦速度を求めた。

(2) 試験の方法

試験は流量調節の後、通水開始→圧力水頭測定・ビデオ撮影→1時間通水終了→排水→侵食状況確認という手順を繰り返し、試験終了後に10cm×10cm格子で植生面の侵食形状を計測する（図-5）。試験の直前に茎丈を5cm程度に刈った植生ピットを水路中央に固定し、断面平均流速1m/sから5m/sまで1m/s刻みで各1時間通水し、流水による植生の耐侵食性を把握する。ここで断面平均流速とは、設定流量を初期断面積（ 0.2m^2 =水路幅1m×水深0.2m）で割った値である。

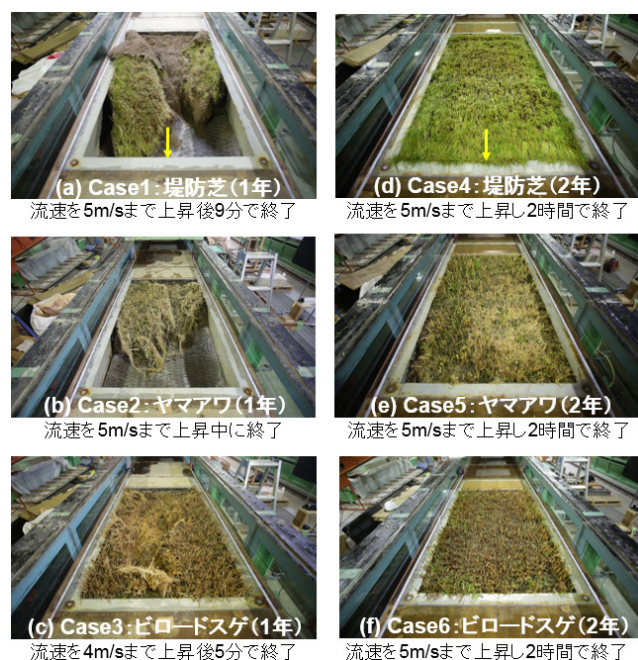


図-6 通水試験後の植生状況（下流から望む）

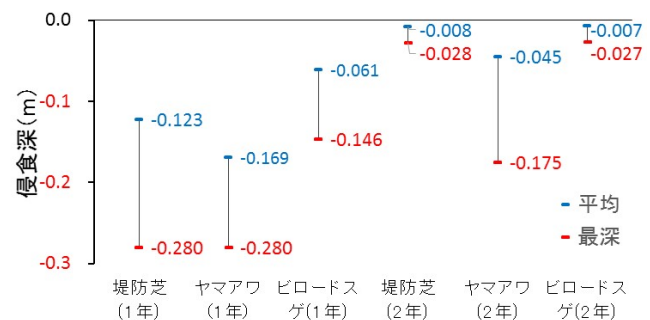


図-7 耐侵食試験後の平均侵食深と最深侵食深

(3) 耐侵食試験結果

耐侵食試験通水中では、流水によって地表面が侵食されるが、高速流により葉や茎が下流方向へ倒伏し、地表面を覆う状況が確認できた。また侵食の進行に伴い地中の根や地下茎が地表面を覆っているのが確認できた。試験終了後の地表面の植生状況を図-6、試験終了時の侵食深を図-7に示す。

a) Case1：堤防芝生育1年

生育期間1年の堤防芝は、平均流速を5m/sに上昇後、9分間通水した時点で大きな侵食を確認し、その時点で実験を終了した。平均侵食深は12.3cmであった。

b) Case2：ヤマアワ生育1年

生育期間1年のヤマアワは、平均流速を4m/sから5m/sに上昇中に大きな侵食を確認したため、その時点で実験を終了した。平均侵食深は16.9cmであった。

c) Case3：ビロードスゲ生育1年

生育期間1年のビロードスゲは、平均流速を4m/sに上昇後、5分間通水した時点で大きな侵食を確認し、その時点で実験を終了した。平均侵食深は6.1cmであった。

生育1年の植生は、植生ピットの下流端部で表土と植

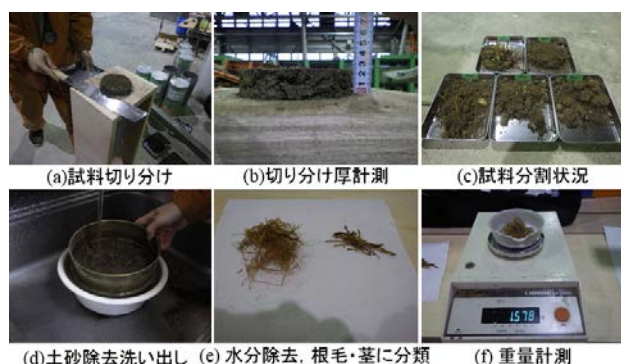


図-8 根毛量の計測手順

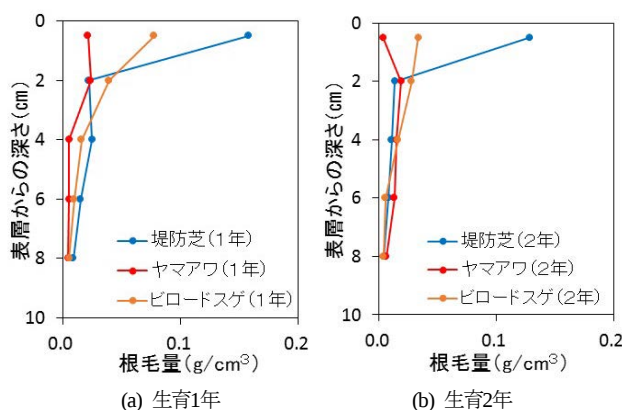


図-9 根毛量の鉛直分布

生が侵食され裸地化することで植生の耐侵食機能が失われ、一気に侵食した。これらから生育1年の植生の侵食限界流速は3m/s～4m/s程度と考えられる。

d) Case4：堤防芝生育2年

生育期間2年の堤防芝は、平均流速を5m/sまで上昇後2時間通水しても大きく侵食しなかった。平均侵食深は0.8cm、最深侵食深は2.8cmであった。

e) Case5：ヤマアワ生育2年

生育期間2年のヤマアワは、平均流速を5m/sまで上昇後、2時間通水後に実験を終了し、侵食形状を計測した。平均侵食深は4.5cm、最深侵食深は17.5cmであった。

f) Case6：ビロードスゲ生育2年

生育期間2年のビロードスゲは、平均流速を5m/sまで上昇後、2時間通水しても堤防芝(case4)と同様に大きく侵食しなかった。平均侵食深は0.7cm、最深侵食深は2.7cmであった。

生育2年の植生は、ヤマアワが平均流速5m/sで大きく侵食したものの、堤防芝とビロードスゲは侵食が少なく平均で1cm以下の侵食深であった。これらから、生育2年の植生の侵食限界流速は5m/s程度と考えられる。

4. 植生及び土壌の耐侵食強度の評価

(1) 根毛量調査

侵食試験前に植生ピットより直径100mmの供試体を採

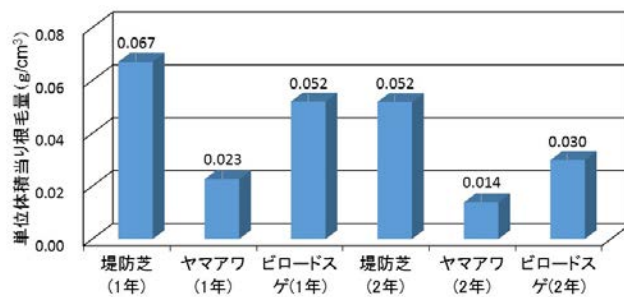


図-10 表層から深さ3cmまでの根毛量



図-11 ペン式根系強度計

取し、根毛量の鉛直分布を調査した。採取した試料は、表層より1cm、3cm、5cm、7cm及び9cmの深さで5層に切り分けサンプルし、水洗いによって根及び地下茎のみを取り出し、乾燥後にそれぞれの重量を測定した(図-8参照)。この結果を、各々のサンプルにおける単位体積当りの根毛量 (g/cm^3) に換算して整理した。

図-9は、表層から深さ9cmまでの根毛量(根と地下茎の合計)の鉛直分布を生育1年の植生と2年の植生でまとめたものである。根毛量は表層から3cm(1cmから3cmまでの根毛量は図中深さ2cmにプロットした)までが多く、堤防芝、ビロードスゲ、ヤマアワの順に多いことが分かった。また、生育1年の植生より生育2年の根毛量が少なくなっており、根茎が枯れて土塊に空隙が発生した可能性がある。

表層から3cmまでの根毛量を整理して図-10示す。根毛量は、生育1年と2年ともに堤防芝、ビロードスゲの順に多く、ヤマアワが最も少ない結果であった。既往研究^{4),5)}では、地表近傍の根毛量が多いほど耐侵食性が優れていると述べており、生育1年と生育2年の植生グループで耐侵食試験後の侵食深(図-7参照)を比較すると、いずれも根毛量が最も少ないヤマアワの平均侵食深が大きいことから、本研究においても、根毛量が多い種ほど耐侵食性に優れている結果となった。



図-12 ベーン式根系強度計による根系強度



(a) 土検棒による測定状況 (b) 機器の全体構成⁹⁾
図-13 土検棒による土壌硬度の測定

(2) 根系強度

根系強度は、簡易に堤防表層の根系の強度を調査する手法であるベーン式根系強度計で調査した（図-11）。

ベーン式根系強度計は、測定位置にベーン式根系強度計を固定する役割を果たす内側の金属製円盤とトルクの測定に係わる外側の円盤からなり、植生表面に差し込む金属の尖った棒が円心円上に固定されている。上部にはハンドルとトルク計が設置されており、金属棒を通し外側の円盤をねじ回す仕組みとなっている。使用法は、円盤についている尖った金属棒を植生土中に差し込み、ハンドルを回転させると、根系のせん断力がトルク計に表示されるため、現地での試験に適している⁸⁾。

表層から3cmの根系のせん断力を耐侵食試験前後に各3回測定し、その平均値で評価する。調査結果は、図-12に示すとおり耐侵食試験前は堤防芝とビロードスゲの根系強度が高く400kgf・cm以上であり、ヤマアワは300kgf・cm以下の低い値を示しており、生育2年植生の試験後の値をみるとビロードスゲの根系強度が高いのが分かる。根系強度が300kgf・cm程度では根毛量が多くシバの状態も良いと判定⁵⁾されていることから、堤防芝とビロードスゲは十分な強度に達していると考えられる。なお、生育1年の植生グループは、いずれも耐侵食試験後に大きく侵食したため（図-6(a), (b)参照）支持層が破壊されて根系強度が200kgf・cm以下になったと考えられる。一方、生育2年の植生グループは、耐侵食試験による大きな侵食が無かったため試験前後における根系強度の差は

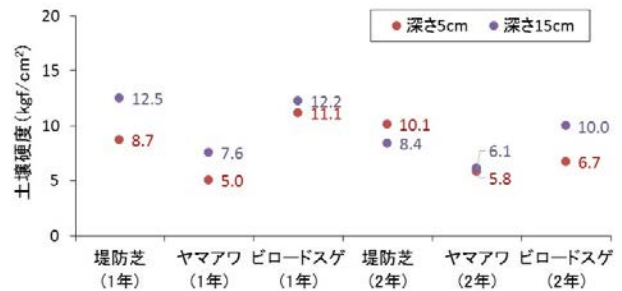


図-14 土検棒の貫入試験による土壌硬度

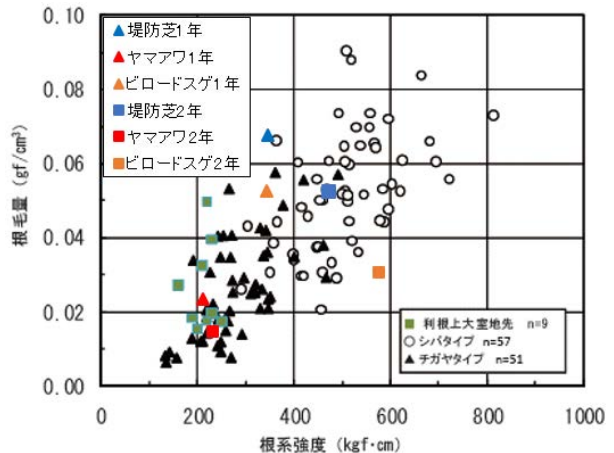


図-15 根毛量と根系強度の関係（参考文献¹⁰⁾に加筆）

ほとんどない。したがって試験後の根系強度が高いほど耐侵食性に優れているといえる。

(3) 土壌硬度

各植生ピットの土壌硬度は、土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チームが開発した土層強度検査棒⁹⁾（以後、土検棒）を使用し、耐侵食試験前後に鉛直方向5cmと15cm地点で各5回計測した（図-13）。土検棒は、先端コーン先端コーンつきの細いロッドを人力で静的に押し込むことにより土壌硬度や土層深を簡易に測定する試験（土検棒貫入試験）である⁹⁾。試験結果は、土壌硬度（kgf/cm³）に換算して深さ毎に平均値を算出し、図-14に整理した。

土壌硬度は、堤防芝とビロードスゲが大きく6.7～12.5kgf/cm³の値を示し、ヤマアワは5.0～7.6 kgf/cm³の値を示している。また生育1年の植生は、根が含まれる深さ5cmよりも深さ15cm地点の土壌硬度が大きくなっており、生育2年の植生と比較しても大きい値を示した。この傾向は根系強度と同様であり、根系が発達している土層では土壌硬度が大きいと考えられる。生育2年の植生は、3種ともに生育1年の植生よりも土壌硬度が低い同程度の値を示していることから、根毛量の減少による空隙の増加が影響していると推測される。

(4) 考察

本研究による根毛量と根系強度の関係を既往研究¹⁰⁾の結果と合せて図-15に示す。これによると堤防芝とビ

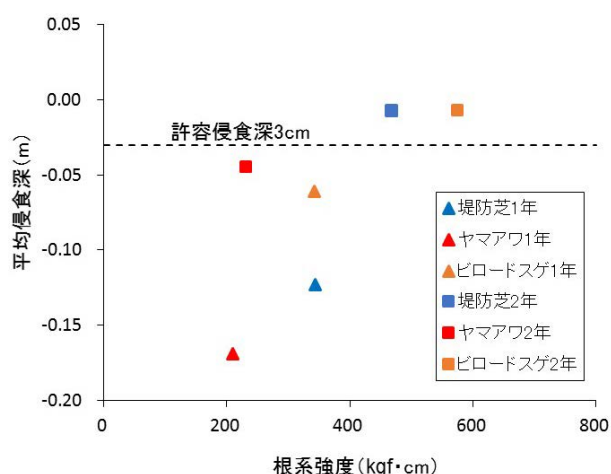


図-16 平均侵食深と根系強度の関係

ロードスゲは、本州の堤防植生として多用されている芝と同程度の根毛量と根系強度を示し、ヤマアワはチガヤと同程度位置にプロットされた。土木研究所資料⁵⁾によると地表面近傍の根毛量が多い芝は、チガヤに比較して耐侵食性が優れているとある。すなわち地表面近傍に多くの根毛量がある場合、根毛層内の流れは、網状に分布する根や地下茎が流水に対して抵抗になるため、地表面近傍の流速は遅くなり、それに伴い地表面に作用する掃流力が小さくなると考えられる。掃流力の代表値として摩擦速度 u_* (m/s) で生育2年の植生を評価すると、平均流速5m/s時の植生面の摩擦速度は、堤防芝が0.490m/s、ヤマアワが0.654m/s、ビロードスゲが0.582m/sとなり根毛量が多いほど摩擦速度は小さくなった。生育2年の堤防芝とビロードスゲの平均侵食深は1cm以下であることから、地表面近傍の根毛量が多い根毛層が侵食を抑制する効果を発揮したと考えられる。

図-16には平均侵食深と根系強度の関係を示す。ばらつきはあるものの概ね正の相関関係がみられ、根系強度が400kgf・cm以上であると平均侵食深を1cm以下に抑制できた。この侵食深は、福岡ら^{3,4)}による堤防法面の許容侵食深(根毛層厚3cm)以下であった。

5. まとめ

本研究では、在来種の実河川への導入に先立ち、従来の外来牧草種と比較して、どの程度の流速まで耐えうるかを流水による耐侵食試験で確認し、草本の耐侵食性を表すパラメータとして、根毛量や根系強度並びに土壌硬度との関係性を調査し耐侵食性を評価した。その結果を以下に列記する。

- 生育1年の植生は、植生ピットの下流端部で表土と植生が侵食され裸地化することで植生の耐侵食機能が失われ一気に侵食した。生育1年の植生の侵食限界流速は平均流速で3m/s～4m/s程度であった。

- 一方、生育2年の植生では、ヤマアワは平均流速5m/sで大きく侵食したが、他植生は流速5m/sで2時間通水しても平均侵食深は1cm以下と大きく侵食しなかった。これらから、生育2年の植生の侵食限界流速は5m/s程度と考えられる。
- 各草種とも、生育1年と比較して2年の方が根毛量は少ないものの、耐侵食性は生育2年の方が大きかった。一方、試験後の根系強度及び土壌硬度は生育2年の方が大きく、これにより耐侵食性に差が出たものと考えられる。またヤマアワは他種と比べて根毛量が少なく、生育2年でも侵食されやすいことが分かった。
- 従来堤防植生とビロードスゲは同程度の根系強度を示し、生育2年の侵食限界流速は5m/s程度であった。ビロードスゲは、従来堤防植生と同程度の根系強度と侵食特性を示すことから、堤防法面緑化に適用可能な在来種と示唆される。
- 今後は、堤防植生の不良箇所の要因分析と改善方法の評価を行い、堤防の耐侵食性向上に向けた検討を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 矢部 浩規・林田 寿文・数馬田 貢・桃枝 英幸：堤防法面への在来種植生導入に関する調査、寒地土木研究所月報No.708, pp.30-37, 2012.5.
- 2) 谷瀬 敦・林田 寿文・平井 康幸：寒冷地における堤防法面への在来種植生導入に向けた試験植栽について、寒地土木研究所月報No.753, pp.28-33, 2016.2.
- 3) 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, 1994.5.
- 4) 服部 敦・平館 治・藤田 光一・宇多 高明・関口 利昭・宮下 光泰：堤防の耐侵食性の評価方法に関する研究、第2回 河道の水理と河川環境シンポジウム論文集 pp.73-80, 1995.
- 5) 建設省土木研究所 河川・湖沼・研究室：洪水流を受けた時の他自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動、土木研究所資料第3489号, 1997.1.
- 6) 中陳 実咲希・中村 大・川口 貴之・川尻 峻三・山下 聡・山口 混平：X線CTスキャンを活用した土の侵食抵抗試験に関する基礎的研究、河川技術論文集、第25巻, pp.505-510, 2019.
- 7) 北海道開発局 建設部 河川工事課：河川工事設計施工要領(平成29年3月改訂), 2-2-38(H23 改), 2017.3.
- 8) 佐々木 寧・戸谷 英雄・石橋 祥宏・伊坂 充・平田 真二：堤防植生の特性と堤防植生管理計画、河川環境総合研究所報告第6号, pp.69-105, 2000.
- 9) 独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム：土層強度検査率による斜面の土層調査マニュアル(案), 土木研究所資料第4176号, 2010.7.
- 10) 佐々木 博章・河崎 和明・益子 隆一・福田 正晴・柴田 邦善：生物多様性の豊かな堤防植生を創出させる緑化技術開発(第1報)、河川環境総合研究所報告第17号, pp.44-62, 2011.

(2020. 4. 2受付)