

越流による堤防裏法面侵食に及ぼす植生の影響に関する実験

東北大学工学部 佐藤元泰

東北大学大学院工学研究科 野手武・有働恵子・真野明

1 実験背景と目的

近年の局所的豪雨、大雨の頻度増加など気象環境の変化によって、堤防の計画高水位を超えて洪水になる危険性は増加しており、これに対応した治水計画が要求されている。また、公共事業費削減の政策や予算縮小を望む世論などコスト面にも配慮する必要がある中、既存堤防の強化方法や評価方法の確立は、求められる治水計画にとって有益な情報となる。

洪水に対する堤防の評価において、堤防の計画高水位を超えて越流破堤の可能性がある場合の破堤予測には、破堤にいたる物理的過程の解明が必要不可欠である。過去の破堤事例の観測や実スケールの実験によって、越流侵食と破堤に至るまでの様々な物理的要素との関係性は巨視的には明らかになりつつある。

この物理的要素のひとつに堤防裏法面に生える植生が挙げられる。実スケールの実験(国土交通省, 2006) 1) では、植生がない場合に比べ、ある場合は侵食の速さが遅くなる結果となり、また同じ植生が生えている場合でも刈り込んである場合のほうが、放置され背が伸びた状態より侵食速度が低減されている。しかしこのような植生が洪水のような流速の速い流れに及ぼす影響の研究は数少ない。よって今回の実験では、この植生の堤防裏法面侵食に及ぼす影響を、洪水時の基本的なモデルを使い、植生による底面せん断力への影響と土砂の巻き上げフラックスに注目し、その関係性を実験で明らかにすることを目的とする。

2 実験方法

2.1 現象の簡易モデル化

堤防を越流した流れは、裏法面で常流から射流へ変化する。流速は加速し、水深は等流水深となる。ここで起こる侵食は、流れ方向の底面せん断力によっておこる土砂輸送と考えると、射流で速さが速いために輸送形態は浮遊が卓越し、また、裏法面法肩では流水中の浮遊砂濃度は低く、土砂の巻き上げが激しく起こると考えられる。底面に植生がない場合、等流条件で流水が受ける重力は底面のせん断力と釣り合っている。植生が存在すると、重力はせん断力と植生の茎・葉部分の抗力の和と釣り合う。この植生の抗力によって、底面せん断力は小さくなるため、土砂の巻き上げフラックスも小さくなると予想される。また、植生の根の体積分、底面の土砂体積も減るため巻き上げフラックスは減少する。

これらの基礎的現象をモデル化した実験装置を用いて検証していく。

2.2 実験装置

これらの現象をモデル化し、水理実験を行う。用いる実験装置を写真1~3に示す。乱流境界層の発達や土砂の浮遊条件を考慮し水路長は5m、水路幅は0.2m、勾配は1/10に設定した。水

路床は上流端より 4.4m は発砲ポリスチレンによる固定床，下流端より 0.6m を実験ケース部として発砲ポリスチレンの固定床と土砂の移動床の 2 種類とした。これは移動床の実験で巻き上げられた土砂量を巻き上げフラックスとして近似するためである。植生の茎・葉モデルには竹ひごを用い，路床全面に 2cm 間隔で高さ 3cm，円柱状のものを正方 45 度ねじれに配置した（写真 4）。植生の根モデルには，ラッカーやペンキの研磨除去に用いられるたわしを用いた。



写真 1 実験装置（横から） 写真 2 実験装置（縦から）

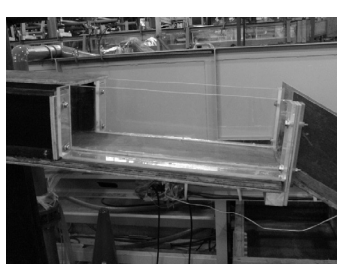


写真 3 実験装置（流速測定部） 写真 4 植生モデル

2.3 実験ケース

実験ケースは，固定床に植生モデルを埋め込むケース（ケース 1），移動床に植生の茎・葉モデルを埋め込むケース（ケース 2），移動床に植生の茎・葉モデルと根モデルを埋め込むケース（ケース 3）の 3 種類とした。

ケース 1 では 5, 8, 11 L/s の 3 種類の流速を用いて，底面 0.2mm，1.0mm，2.0mm から水面付近まで 2.0mm 間隔で流速を 100Hz のサンプリング周波数で測定する。これにより，水路に対しての鉛直流速分布と流速乱れを求め，これにより底面せん断応力を以下の式によって算出する。

$$\tau = -\rho \overline{u'v'}$$

τ : せん断応力, ρ : 密度, u' : 流下方向の流速乱れ, v' : 横断方向の流速乱れ

また，過去の実験データと分布を比較，検討する。

ケース 2 では植生がある場合のせん断力と巻き上げフラックスの関係を調べるため，ケース 1 と同様の流速の水を流し，土砂の巻き上げフラックスを求める。これは巻き上げられた土砂を水路下流端でトラップし，体積を測定することで近似する。またケース 1 で求めた底面付近せん断応力との評価を行う。

ケース 3 では密度の異なる植生の根モデルによる土砂体積の減少が巻き上げフラックスの減少に影響するかを調べる。ケース 2 と同じ実験を行い，巻き上げフラックスの変化を評価する。

2.4 予備実験

2.4.1 流量設定

水路を流れる水量は、実験水路前に設置したバルブの開度によって決まる。設定水量は実験水路下部に取り付けた直角三角堰の越流水深によって算定し、設定した流量に達した時のバルブ開度を本実験に用いた。

用いた直角三角堰を写真 5 に、流量式を以下に示す。

$$Q = Ch^{5/2}$$

$$C = 1.350 + \frac{0.004}{h} + (0.14 + \frac{0.2}{W^{1/2}})(\frac{h}{B} - 0.09)^2$$

Q : 越流量(m^3/s) h : 越流水深(m)

C : 流量係数($m^{1/2}/s$) B : 水路幅(m)

W : 水路底面より切欠き底点までの高さ(m)



写真 5 直角三角堰

2.4.2 等流確認

任意の流量 3 ケースで水路に水を流し、流下方向 17 地点で水深を測り、水の流れが等流であるかを確認した。実験の様子を写真 6 に、結果を図 1 に示す。横軸は測点、3 ケースともほぼ水深は変化していないため、実験水路が等流であることを確認した。



写真 1 推進の測定

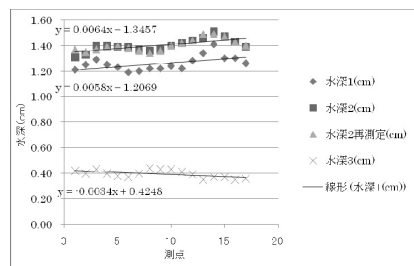


図 1 等流確認

2.4.3 流速計とロガーの設定

本実験で流速を測定する際に、レーザー流速計を用いた。この流速計から出力される計測電圧値はデータロガーを通じて PC に C-Logger ファイル, Excel ファイルとして転送され、係数をかけて流速値とする。このときアクリル板の汚れや水中の気泡によってレーザーが妨げられるケース、ロガーの設定間違いによる設定された電圧値と出力された電圧値が異なるケース、PC での処理速度が転送されてくるデータ量に追いつかずに処理落ちするケースがないことを確認した。

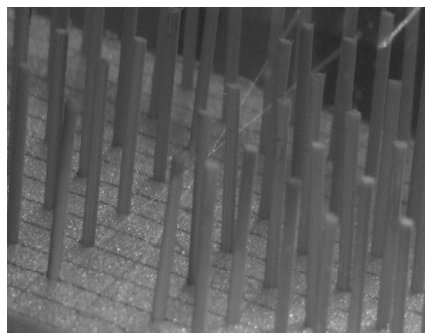


写真 6 レーザー流速計での流速測定

3 実験結果と考察

3.1 ケース 1 流速分布, 流速乱れ分布結果

今回の実験流量 5, 8, 11L/s の流速分布と植生がない場合の流量 10L/s の対数則による流速分布の理論値を図 2 に示す。横軸が流速, 縦軸は底面からの距離を植生高によって無次元化した値である。植生がない場合は底面付近でも流速が 100cm/s を越えているのに対して, 今回の実験値は 50cm/s 程度までに抑えられている。この傾向は植生高付近まで見られ, 植生がなくなると流速が増加している。流量が多い場合ほどこの傾向は顕著になると考えていたが実際には流量の違いで植生外層での流速の増加が現れることはなかった。

次に, 流下方向にとった流速乱れ強度の分布を図 3 に示す。横軸に乱れ強度, 縦軸は図 2 と同じ底面からの距離を植生高によって無次元化した無次元量である。速度勾配が最大となるために流速乱れはいずれのケースでも植生高で最大値を示している。図 2 の流速分布では 3 ケースと植生層内では分布に変化が表れなかったのに対して, 流速乱れ分布の図 3 では流量が 5L/s のケースと 11L/s のケースで流量がほぼ倍になると乱れの値も倍となっている。また横軸を最大乱れ強度で無次元化した図 4 を見てみると分布の形は 3 ケースとも似ており, 乱れの構造は流量に関わらず同じような構造をしていることが分かる。

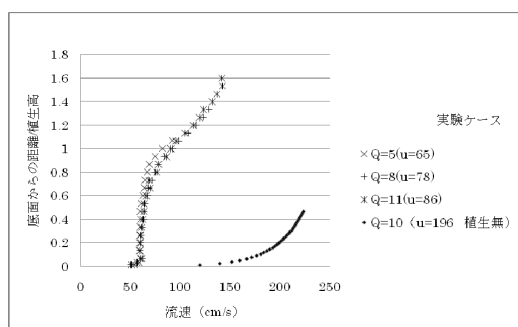


図 2 流速分布

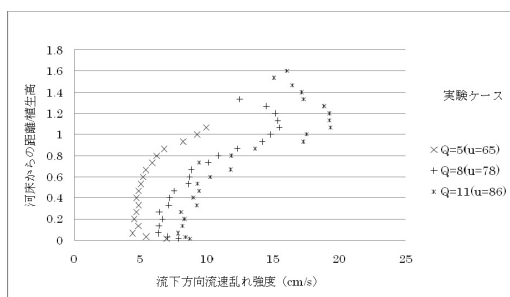


図 3 流速乱れ強度分布図

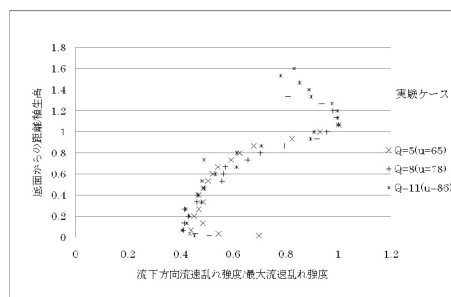


図 4 流速乱れ強度分布 2

3.2 ケース 1 流速分布, 流速乱れ分布の過去の実験値との比較

今回測定した流速分布, 流速乱れ強度分布と乱流条件で過去に行われた実験(清水ら, 1991)の実験値との比較を図 5, 図 6, 図 7 に示す. 清水らの実験では勾配を 1/1000 程度とし, 流速を今回の実験より抑え, 3 ケースのデータを残している. 図 5 で, 今回の流速分布は流量の違いからその分布位置は異なっているものの, 分布傾向は清水らの実験ケースと近い分布を見せている.

図 6 の流速乱れ分布では, 図 3 での考察と同様, 清水らの実験でも流量が増えると流速乱れ分布は増えていることが分かる. 図 7 は図 4 と同様, 横軸を最大流速乱れ強度で無次元化した値とした. 今回と清水らの全ケースで植生上端部の流速乱れが最大となり, 植生層, 植生外層に入るにつれ流速乱れは小さくなっており, 同様の流れ場構造を成している. しかし河床位付近では, 今回の実験と清水らの実験で分布が異なり, 清水らの実験の場合は底面付近で乱れは収束方向に向かうのに対して, 今回の実験では底面付近で乱れ強度は増加している. これは今回の実験と清水らの実験で, 植生モデルの格子配置が違うこと, 底面材質の違いなど実験条件が異なっているため, 现阶段で何が原因なのかを確定することはできない.

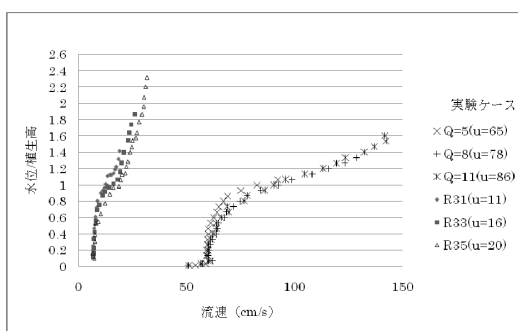


図 5 清水らとの比較 流速分布

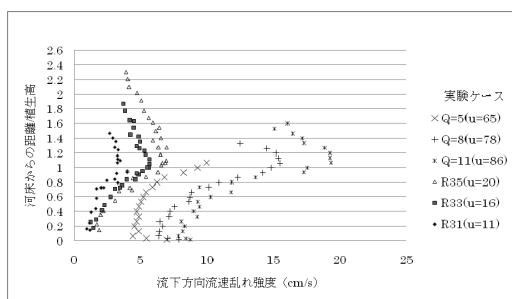


図 6 清水らとの比較 流速乱れ強度分布

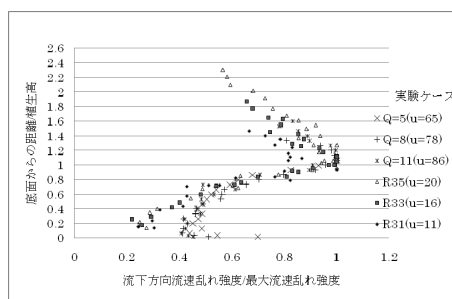


図 7 清水らとの比較 流速乱れ強度分布 2

4 まとめと実験の今後

植生有と無の流速比較で、植生が流速を減衰させていることが分かった。今後、 $K-\varepsilon$ モデルによって出されたせん断力との関係、また今回出された流速乱れからレイノルズ応力から水路に対しての並行成分垂直成分の等方性を仮定して出したせん断力の妥当性も調べていく。

勾配 1/1000 で流速の遅い清水らの実験と、今回の勾配 1/10 で流速の速い今回の実験を比べると、底面に近い個所では分布に差異がでたものの、それ以外では流速乱れの分布が近似していることから底面の流れ場は勾配、植生の配置、流速にかかわらず同じ乱れ構造になっていると予測できる。また、今回の 3 種類の流量での実験値を比較で、流速と流速乱れの分布の関係についても考察の余地が残されているので今後明らかにしていきたい。

実験は今後実験ケース 2, 3 による実験を行い、せん断力との関係を考察するため土砂の巻き上げフラックス量を求める。

参考文献

- 1)国土交通省河川国道事務局：平成 19 年度須川堤防実験解析検討業務報告書
- 2)清水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠紀：直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究，土木学会論文集，1991