

堤防法面張芝の侵食限界

Erosion Limit of Sod on the Slope of Levees

東京工業大学工学部土木工学科 福岡捷二 Shoji FUKUOKA

総合研究開発機構研究開発部 藤田光一 Koh-ichi FUJITA

Many failures of levees due to running water are started with the erosion of the surface of levees by running water in an early stage of the failure. From the results of analysis of disaster cases and the results of experiments, it was clarified that sodded levees having vegetation on the surface of levees have much higher strengths against erosion due to running water compared to earth levees having no vegetation. Therefore, one of the important factors governing the safety of levees against failures by running water is the erosion resistance of vegetation on the surface of earth levee. However, previous studies were little made on the erosion characteristics of the earth levees having vegetation both domestically and overseas nevertheless the importance of this theme.

This paper will present a method of on-site erosion test using a new device for checking the erosion mechanism and characteristics of earth having vegetation, the erosion characteristics of sod on the slope of levee determined by said method, and a method of predicting the erosion-resisting strength based on the results of the above. Finally, the applicability of the prediction method will be investigated on the basis of survey of sodded levee erosion by a large flood.

Keywords: Erosion, Levee, Vegetation, Field test

1. はじめに

堤防決壊の多くは、その初期に流水による堤体表面の侵食を伴う。被災事例解析および実験結果¹⁾から、堤体表面に植生のある芝張堤は、裸堤に比較して、流水による侵食に対してはるかに大きな耐侵食強度を有することが明らかにされている。したがって、流水による堤防決壊に対する安全度を支配する重要な因子の1つは、土堤表面の張芝などの植生の耐侵食性である。植生を持つ土堤の侵食特性に関する研究は、その重要性にもかかわらず国内外ともに少なく、著者らが調べた範囲では、米国土壤保全局が種々の植生を有する河道の許容流速（流水に対して大きな洗掘を起こさない流速、流水継続時間については明記されていない）²⁾を、侵食を受けやすい土質であるか侵食を受けにくい土質であるか、また、河床勾配の大きさの程度によって分類し、表示しているだけである。この研究成果をそのまま日本の河川堤防に適用するには、土質・植生・河川のスケール・洪水特性の違いといった点で問題が多い。また、堤防の安全度評価を行う上で一律に許容流速という指標を用いるだけでは、不十分である。そこで本研究では、芝を持つ土表面の侵食機構を調べるため、新しい現場試験用の装置を開発し、これを用いた現場侵食試験と、これにより得られた堤防法面の芝の侵食特性について調べる。つぎにその結果にもとづき芝の耐侵食強度の推定方法を提示し、これを現地の被災箇所に応用し、推定法の適合性を検討する。

2. 現場侵食試験器の開発

堤体表面の芝は長い年月をかけて生育したものであり、数か月程度の養生を経た芝とは、耐侵食特性が大きく異なる。そこで現場で手軽に、しかも地表面を乱さないように芝の侵食特性を調べることのできる装置を開発した。図-1の試験器を製作し試験場所に打込む、と地表面を底面とする広長方形断面の管水路ができあがる。この試験器に通水し、通水後に地表面高を測定することにより地表面の侵食特性を調べる。水が地表面上を通過する部分の諸元は高さ 5cm、幅 40cm、流下方向の長さ100cmである。試験器本体は鋼板でできており、埋め込み部、本体上蓋に3分割できる(図-2参照)。給排水は、試験地点の近くに仮設の貯水池を設け、ポンプを用いて貯水池の水をパイプ経由で試験器に送り、試験器からの水を再び貯水池に戻すことにより行う。流量測定は、パイプに取付けられたベンチュリーメーターにより行う。地表面高の測定は、上蓋を取り外して行う。上蓋の一部は透明なアクリル板でできており、通水中の侵食状況を観察できる構造となっている。

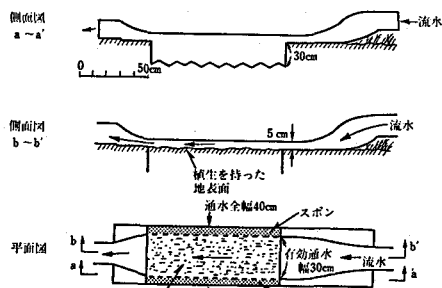


図-1 現場侵食試験器概要図

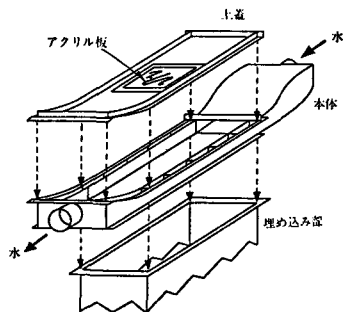


図-2 現場侵食試験器の構成

実物の 1/2縮尺の試験器模型を造り、底面近傍の流速測定、染料を流しての流況観察を行った。その結果、侵食による地表面高の低下によって生じる試験範囲上下流端の段差の影響の及ばない範囲では試験器底面においてほぼ様な流れが生じていることが確認された。この実験結果をもとに、侵食による地表面高の低下量 3cm程度を想定して、段差の影響が現われる試験器内の上下流端 20cmを試験範囲から除き、さらにパイピング防止のためスポンジがあてがわれた両端 5cmを除き、試験範囲を縦 60cm 幅 30cmと決定した。また、地表面高の測定は、横断方向 1.5cmピッチ、流下方向 5cmピッチの計 260点で行うことにした。

表-1 現地調査地点の土性値(4地点の平均)

比重	飽和度(%)	間隙比(e)	粒度組成(%)				粘着力(kg/cm ²)	せん断抵抗角(deg)
			レキ	砂	シルト	粘土		
2.67	88	1.62	0	37	56	7	0.17	10°

3. 現場侵食試験器を用いた芝の侵食特性の把握

3.1 現場試験の概要

現場試験は、江戸川の高水敷上で、表層が芝により均一に覆われているところで行なわれた。本来この試験は芝張堤上で行われるのが望ましいが小さな規模であっても堤防に損傷を与えることはさげなければならないことから、芝張堤と類似の環境にある高水敷上で実験を行った。試験場所の土質は表-1に示すとおりほぼシルトと砂から成っており、耐侵食強度の小さい砂分が多く耐侵食強度の大きい粘土分がほとんどないことが特徴である。芝の根は、平均的に 10cm程度の深さまで張っていた。試験は 12月～1月にわたって行われた。試験方法は、試験範囲の芝を長さ数cmまで刈り込み、試験器を設置した後初期地表面高を測定し、次に一定時間通水した後地表面高を測定するという手順を繰り返すものである。試験は試験器内の初期流速を 1～3m/sの範囲で変えて行った。総通水時間は120分とした。なおここで言う初期流速とは、初期地表面高から得られる通水前の平均的な通水断面積で流量を割った値である。

3.2 調査結果の解析

3.2.1 侵食過程

侵食過程の特徴的な点は、図-3に示されるように、通水中、根の間にある土粒子が次第に抜けていき、やがて表面に根だけの層が現れ、この層の厚さが時間と共に大きくなる

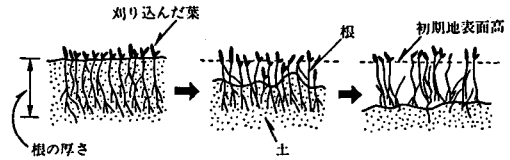


図-3 侵食過程

ことである。ただし根の密度が場所的に不均一なために、一部は土の抜け落ちが早く一部は遅いなど侵食の進行は必ずしも一様ではなかった。図-4は2分後と50分後の平均侵食深 y 及び最大侵食深 y_m 初期流速 v_0 との関係を示したものである。 y はすべての測定点における侵食深の平均値である。図より v_0 が大きいかほど侵食深が大きくなるという明確な傾向をもっており、侵食速度が流速に強く依存することがわかる。また、最大侵食深 y_m は、平均侵食深 y の2～3倍程度である。

平均侵食深 y と時間 t との関係は、平均侵食深が通水初期に急激に大きくなり、以後侵食深の増加速度が小さくなるという傾向を持つ。試験終了後（120分通水後）の平均侵食深は最大5～6cm程度に達した。平均侵食深 y と通水時間 t との関係を調べたところ、図-5に示すように式（1）で良く表せることがわかった。

$$y = A \cdot \log_{10} t + B \quad (1)$$

ここで y : 平均侵食深 [cm], t : 時間 [min]

そこで、実測の $y \sim t$ 関係から各ケースの、 A , B を求め、その特性を調べた。図-6に初期流速 v_0 と A との関係を示す。 v_0 の増大に伴って A が増加するという明確な関係が存在することがわかる。一方 B と v_0 には明確な関係が見られず、また、その平均値は0.6cm、変動幅は大きく ± 0.4 cmであった（図-7参照）。 B は式（1）より、 $t = 1$ 分の時の平均侵食深に相当する。 B の値が試験終了時の侵食深にくらべかなり小さいことから、 y の時間変化特性は A の値によってほぼ決まると考えられる。図-6に見られるように、 A 値が初期流速 v_0 の増大に伴って増加するのは、図-4に示したように流速が増大するにつれ侵食速度が増大するためである。一方 B 値は、根の耐侵食効果が現れる前に流水によってすぐに侵食されてしまう表面のごく薄い層の厚さを表しているものと考えられ、侵食特性の評価にとっては重要ではない。

3.2.2 侵食速度を支配する因子とその影響

式（1）を変形すると式（2）に示すように侵食速度 V と平均侵食深 y との関係が得られる。一方試験器内の流速 v と y との間には式（3）に示す関係が成立する。

$$V = dy/dt = A / (\ln 10) \cdot \exp\{(\ln 10) \cdot (B - y)/A\} \quad (2)$$

$$v = v_0 / (1 + y/H) \quad (3)$$

ここで、 H : (初期通水断面積の縦断平均値/通水幅)である。3.2.1で得られた A , B 値を用いることにより式（2）,（3）から種々の y に対応する V と v の値を求めることができる。

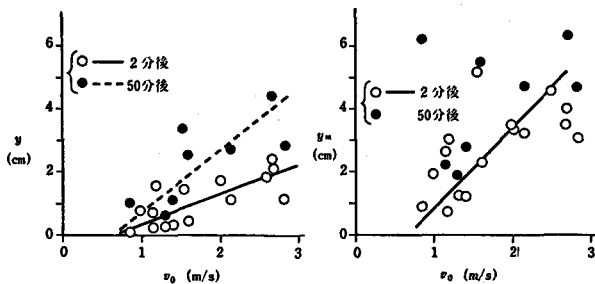


図-4 2分後と50分後の y 及び y_m と v_0 との関係

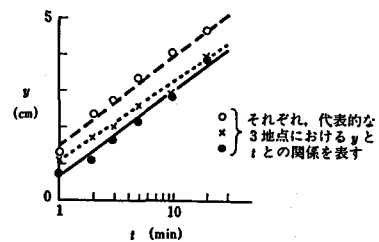


図-5 $y \sim t$ 関係の代表例

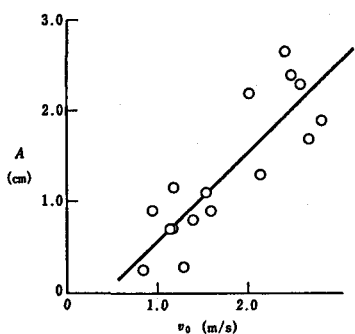


図-6 A と v_0 との関係

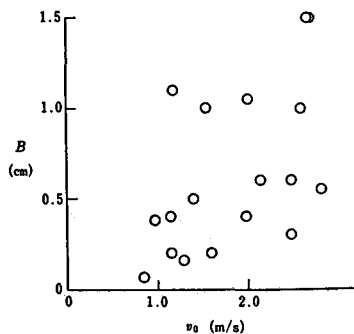


図-7 B と v_0 との関係

表-2 $v \sim A_0 \sim B_0$
関係

$v(\frac{m}{s})$	A_0	B_0
1.0	0.95	0.50
1.5	1.89	0.44
2.0	2.70	0.33
2.5	3.3	0.20

図-8は侵食試験より得られた全てのA, B値を用いて式(2), (3)より $v \sim y$ 面上にVの値をプロットし、それを基に $v \sim y$ 面上にVのコンタ(等侵食速度線)を描いたものである。なお等侵食速度線を描くにあたっては、平滑化を施している。図-8より、侵食速度Vが侵食深と流速に支配されており、流速 v が小さく、侵食深 y が大きいほどVが小さくなるのがわかる。Vが v だけでなく y にも影響を受けるのは、深いところにある土の方が表層の土よりも耐侵食性が高いことと、侵食深 y が大きくなると土粒子が抜け出たあとの根が流れを阻害するようになることが原因である。

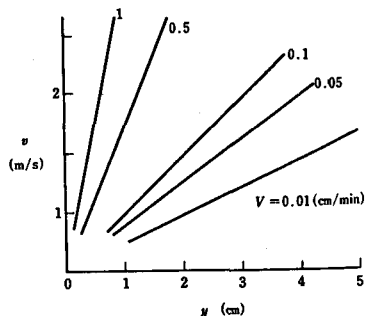


図-8 $v \sim y$ 面上における侵食速度 V のコンタ図(等侵食速度線)

ところで、3.2.1に示した $y \sim t$ 関係は、式(3)からわかるように y の大きさが変化すると伴って流速 v も変化するために、同一の流速の下での $y \sim t$ 関係になっていない。そこで、図-8に示した結果を用いて、同一流速のもとでの $V \sim y$ 関係を求めてみる。図-9は、図-8の結果から一定流速のもとでの $V \sim y$ 関係を示したものである。この図から $V \sim y$ 関係を式(4)で表せることがわかる。

$$\log_{10} V = ay + b \quad (4)$$

式(2)と式(4)の比較により、A, B, a, b間には式(5)の関係が成立する。

$$A_0 = -1/a$$

$$B_0 = -1/(a \ln 10) \cdot \{b \cdot \ln 10 - \ln(-1/(a \cdot \ln 10))\} \quad (5)$$

なお式(1)のA, Bは、侵食の進行に伴う流速の変化の影響を受けたものであり、これらと区別するため、添字₀を付けている。図-9からa, bを求め式(5)を用いて各流速に対応する $A_0 B_0$ を計算すると、表-2に示す関係が得られる。これより、今回の試験により得られた、一定の流速 v が流れる場合の平均的な $y \sim t$ 関係として式(6)が得られる。

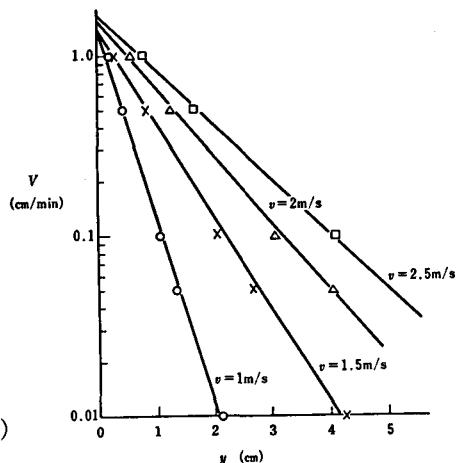


図-9 同一流速に対する V と y との関係

$$y = (1.57v - 0.54) \log_{10} t + 0.37 \quad (6)$$

$$A_0 = 1.57v - 0.54, \quad B_0 = 0.37$$

$$y [\text{cm}], v [\text{m/s}], t [\text{min}]$$

上式が、侵食試験地点における芝の侵食特性を表現していると考えられる。実際の $y \sim t$ 関係は式 (6) の値を中心としてある範囲でばらつくものと考えられる。

3.2.3 土質が侵食特性に与える影響

表-3 地点Ⅱの土性値 (4 地点の平均)

比 重	飽和度 (%)	間隙比 (e)	粒度組成 (%)				粘 着 力 (kg/cm^2)	せん断抵抗角 (deg)
			レキ	砂	シルト	粘土		
2.67	85	1.50	0	17	61	22	0.25	15

前述の試験地点 (以後地点Ⅰと呼ぶ)

と土質が全く異なる場所 (以後地点Ⅱ

と呼ぶ) で行った侵食試験結果から、

前節と全く同じ手順で $A_0 \sim v$ 関係を求

め、その結果を地点Ⅰの $A_0 \sim v$ 関係と一緒に図-10に示す。地点Ⅱの土質は、表-3に示すとおり砂分が少なくシルトと粘土からなり、また根は、深さ 3cm 程度まで張っていた。図より、地点Ⅰと比較して地点Ⅱの A_0 値は非常に小さく、また流速にあまり影響されないことがわかる。この違いの原因は、地点Ⅰと地点Ⅱの土質にあるものと考えられる。すなわち、地点Ⅱの土には地点Ⅰにはない粘土分が20%以上含まれ、粘着力が大きい。また地点Ⅱの A_0 が v の影響を受けないのは、地点Ⅱの耐侵食能力が非常に大きいためと考えられる。以上から、地点Ⅱのように、地表面が侵食に対して強い土質をもっている場合には、土自体が侵食に耐える能力を持つため、植生の根による耐侵食効果は顕著には現われず、一方、地点Ⅰのように土自体の耐侵食能力が小さい場合には、植生による侵食防止効果が顕著になる。しかし、地点Ⅱのような土質を持っている場所は少なく、土自体の耐侵食能力を期待することは一般的に難しいことから、芝張堤の侵食に対する安全度は、地点Ⅰのように土の耐侵食能力が小さく芝による侵食防止効果が卓越する場所の試験結果から判断されるべきであろう。

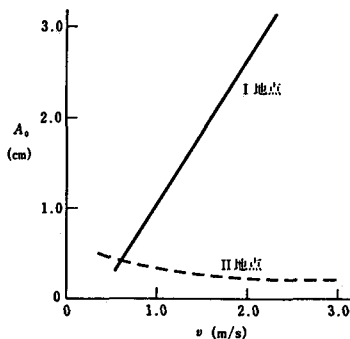


図-10 $A_0 \sim v$ 関係に与える土質の影響

4. 芝で覆われた地表面の耐侵食強度の推定

4.1 耐侵食強度の推定

芝で覆われた地表面の侵食過程は、流水の作用で芝の根の間の土粒子が抜け出し、この土粒子の離脱が根の層全体に及ぶと根のはぎ取られ、その後急激に侵食が進む。このことから地表面の芝の侵食防止効果がなくなるのは、流水による侵食深が根の層厚に達するときと考えられる。このとき、根の下の方の土の耐侵食能力が根の層のそれに比べて著しく小さい場合には、この段階で急激に侵食が進み言わば「破壊」の現象が起こると考えられる。以上の考察から、芝で覆われた地表面における侵食発生の有無を支配するのは、根の層厚に等しい大きさの侵食が起こるのに必要な「流速 v_{cr} 」と「継続時間 t_{cr} 」と考えられる。 v_{cr} と t_{cr} は A_0 と B_0 が既知であれば (6) 式より求めることができる。図-11は地点Ⅰにおける A_0 と B_0 を用いて式 (6) から導かれた $t_{cr} \sim v_{cr}$

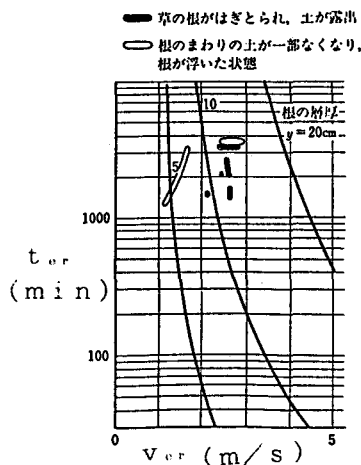


図-11 耐侵食強度推定図と被災箇所への適用

と根の層厚との関係を示す。侵食を起こす外力すなわち流速と継続時間が、芝の層厚に対応する曲線の右上に入る場合には、芝による侵食防止効果が期待できないことを意味する。

4.2 災害調査結果との比較

前節で示した耐侵食強度の推定には、次のような問題が残されている。試験器内で侵食が生じる領域が小さすぎて実際の侵食現象と同じ現象が起きているという保証がないこと、試験器内で芝の破壊を起こすことが困難であるため、耐侵食強度推定の際試験結果の外挿を行わざるを得ないことである。これらの問題はいずれも試験器のスケールが小さくまた十分な流速を試験器内で発生させることができないことに起因している。しかし、試験器の大きさ並びに試験器に送り込む流量に関しては、現場簡易試験という制約条件の中ではここでとりあげた方法が限界であると考えられる。そこで、侵食試験により得られる耐侵食強度とは別に実際の芝張堤で生じた被災状況から侵食特性を求め、両方の結果を比較することにより、侵食試験から得られた結果の有効性について検討する。被災状況調査の対象としたのは、小貝川の堤防でその表面は草で覆われており、堤体は礫混じりの土砂からなっている⁴⁾。草の根の層厚は5~8cmである。図-11には、侵食を受けた地点での、表面流速と流水継続時間がプロットされている。なお、流水継続時間は、侵食発生箇所の水位よりも水位が高かった間の時間とし、この時間は、近くにある水位計による水位~時間曲線と当該侵食箇所近傍の痕跡水位から推定された。図より、草の根がはぎ取られ土が露出するという激しい侵食を受けた箇所は、図中の $y=10\text{cm}$ 以上の領域にあり、一方、根の層の一部の土が抜け落ちただけの軽度の洗掘は、概ね $y=5\text{cm}$ 程度の所にプロットされている。調査地点の根の層厚が5~8cmであることから、災害調査地点の侵食特性が前述の現場侵食試験により得られた耐侵食強度推定図にかなり適合するものになっていることがわかる。上記の結果から、現場侵食試験の結果が芝を持つ地表面の耐侵食強度を推定する指標になりうるとの判断はできよう。

4.3 芝張堤の侵食に対する安全度

図-11は、堤体が比較的侵食を受けやすい土質から成っている芝張堤の侵食に対する安全度を推定するための指標になると考えられる。そこで図-11から、芝張堤の侵食の有無を支配する条件について考察する。実際の洪水における高流速継続時間が数時間~十数時間以上であり、この範囲において図-11の曲線はほとんど縦軸に平行になっている。このことは実際上侵食の有無を支配しているのは v_c であることを意味している。また、通常平均的な根の層厚さは5~10cmの範囲にあると考えられることから、平均的な議論をすれば、流速 1m/s 以下では侵食を受ける可能性は小さく、一方流速が 2m/s を超えると侵食の危険度が大きくなると言えよう。

5. おわりに

今後は、種々の特性を持つ植生と地表面に対し、侵食試験を行い、耐侵食強度と植生状態や土性値等との関係を求めるとともに、被災状況調査により外力と侵食の程度との関係を明らかにする。これによって、植生を持つ地表面における侵食限界について、より一般的な指標が得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) 吉野文雄・土屋昭彦・須賀堯三： 越流水による堤防法面の破壊特性，第24回水理講演会論文集 pp.351~356, 1980
- 2) 建設省土木研究所河川部河川研究室： 越水堤防調査最終報告書一解説編一，土木研究所資料 第2074号，pp.30~38, 1984
- 3) Chow, V.T: Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill, pp.185, 1959
- 4) Fukuoka, S et.al: Levee Overflow Survey and Development of the Armored Levee, 6th Congress of APD, IAHR, pp.417~424, 1988