

植生による越流堤防の耐侵食性に関する調査

中村 巖²・中川博樹³

Iwa o NAKAMURA and Hiroki NAKAGAWA

1. まえがき

一関・平泉地区は 下流の河道の流下能力が小さいため、ひとたび氾濫すると冠水時間が長く自然遊水池となる。この河道特性と堤防の安全度、土地利用を考慮して、越流堤及び本堤の二線堤による一関遊水池事業が進められている。従来、この計画において越流堤に全面アスファルト被覆を計画していたが、①越流堤延長が長いので工費が高い。②アスファルトの劣化や小堤の不等沈下に対する維持・管理に労力を要する。③周辺が田園地帯のため環境上好ましくない。④改築の必要性が生じた場合、アスファルトの撤去が大規模となる。等の理由により、耐侵食性、環境・景観を考慮した植生被覆による越流堤に変更となった。

そこで、越流堤に植生を利用するにあたり、越流水に対する耐侵食性を把握することが必要となった。しかし、この種の問題は模型実験などで植生を扱うことによる再現性・不均一性の評価が困難なため、これまで十分な研究が行われていなかった。

このため、平成5年より3ヶ年にわたり磐井川の旧堤を利用し、植生堤防の耐侵食力を把握するための越流実験を行った。

ここに3年間行った現地実験から判った越流堤法面崩壊に拘わる因子を整理・解析し、一関遊水池における越流堤の管理手法を提示すると共に、越流堤の耐侵食度の簡易的な評価手法について併せて提言するものである。

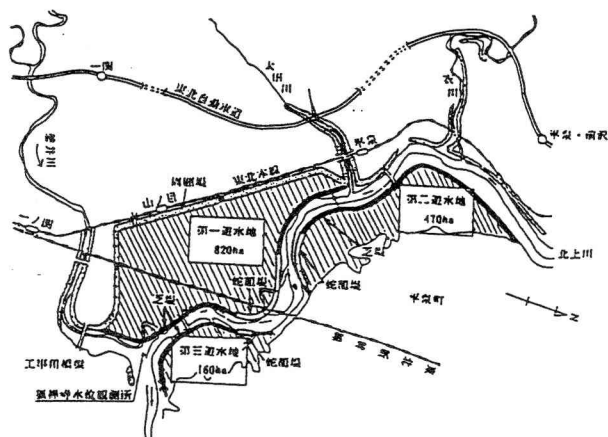


図-1 一関遊水池概要

2. 実験方法

実験施設は、貯水池、給水施設、流入水路、侵食実験水路そして計測装置から構成されており、貯水池は磐井川の旧堤と新堤に挟まれた区域を締切ることにより造成した（写真-1 参照）。

この貯水池に水中ポンプを設置し、天端に設置した整流水槽に揚水し、流量測定堰を経て堤防のり面上に設置した何本かの侵食実験水路に通水し実験を行った。

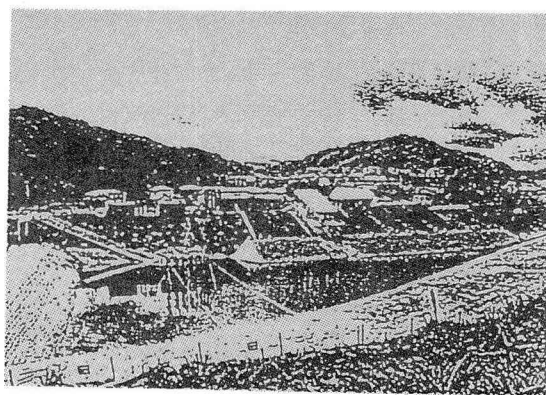


写真-1 実験施設全景

1 キーワード：河川，水理，環境，土木，原稿

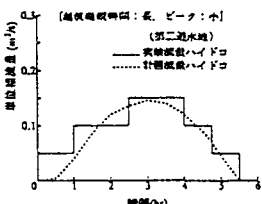
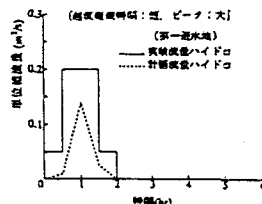
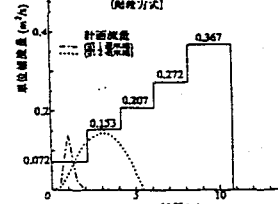
2 建設省 岩手工事事務所 洪水予報課長

3 建設省 岩手工事事務所 洪水予報係長

3. 実験条件

芝堤区間では全延長にわたって同時に越流が始まるのではなく、また場所によって越流継続時間やピーク流量も異なるため、二次元平面流計算により流況を解析し越流ハイドロパターンを選定した。また、耐侵食強度を把握するため、ポンプ1台当たりの通水時間を設定して段階方式の通水をパターンとして、侵食機能の低下度合いにより通水時間を変化させたパターンも設定した。

表－1 実験条件

	平成5年度	平成6年度	平成7年度
目 的	・流量ハイドロを通水した時の侵食状況、侵食過程の把握。 ・植生の刈込の有無による侵食状況の把握。	・のり面勾配の違いによる耐侵食力の定量的評価。	・根毛量による耐侵食力の 定量的評価。 ・越流堤の設計、施工維持管理を想定した侵食形態の把握。
遊水パターン	・二次元平面流計算から得られた越流継続時間が6時間と長くピークが小さいハイドロと、継続時間が2時間と短くピークが大きいハイドロパターン。 	・ポンプ1台に対して2時間通水を基準として、2時間通水後も耐侵食機能があまり低下しない場合はさらにポンプ台数を増加していく段階方式の通水パターン。 	・ポンプ1台に対しての通水時間に拘らず、耐侵食機能が低下しない場合はさらにポンプ台数増加していく段階方式の通水パターン。 
のり勾配	1 : 2. 0	1 : 3. 0 1 : 5. 0	1 : 3. 0
レーン状況	・築堤から30年程度経過した旧堤防ののり面を利用。	・築堤から2、5、10年経過した堤防より2×2×0.5mの土付き植生を採取しのり面を造成して利用。	・築堤から30年程度経過した堤防より2×2×0.5mの土付き植生を採取しのり面を造成して利用。 ・造成したのり面に張芝を施工し2年間育成して利用。
植 生	・植生遷移が終末し、チガヤ、カモガヤ等のイネ科植物が主植種。	・植生遷移が進行中であり、育成年数により植生状況が異なる。 育成2年：芝が優先。 育成5～10年：シロツメクサ、芝が混生またはハルガヤが優先。	・植生遷移が終末し、チガヤ、ハルガヤ、ススキのイネ科植物が主植種。 ・植生遷移が進行していないため芝が主植種。

4. 実験結果

4-1 流況

表-2 流況結果表

	1 : 2	1 : 3 1 : 5
越流流況	射流 水路床の雑草の株等により生じた凹凸によって著しく乱れる。	等流 水面の乱れ、空気の混入率が少ない。
平均流速	植生の種類、刈込みの有無に関係せず、単位幅流量に比例して増加。	越流量の2/5乗に比例。粗度の安定した流れ。 (図-2 参照)
粗度係数	流量の増加に伴い粗度係数減少。 $q \leq 0.1 \text{ m}^3/\text{s} ; n = 0.15$ $0.1 < q < 0.2 \text{ m}^3/\text{s} ; n = 0.08$	流量の増減に関係なく安定。 1 : 3 ; $n = 0.054$ 1 : 5 ; $n = 0.036$
越流量		1 : 3 $q = 2.114 H^{3/2}$ H : 越流水深 (図-3 参照)
のり面水深		1 : 3 $H = 0.262 q^{0.6}$ H : のり面水深 (図-4 参照)

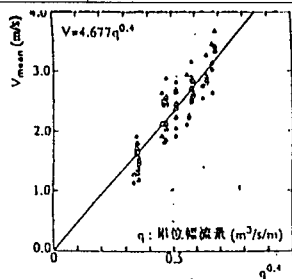


図-2 平均流速と流量
(1 : 3)

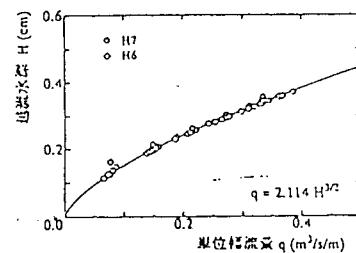


図-3 越流量と越流水深の関係

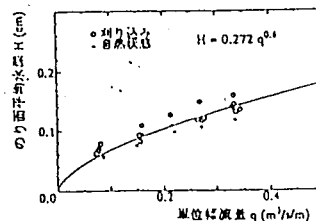
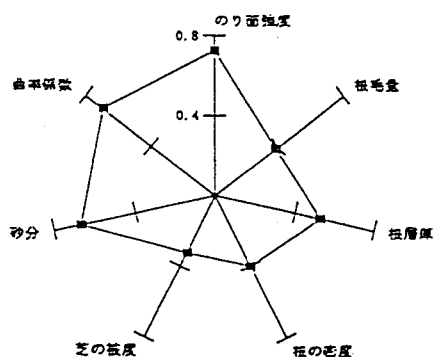


図-4 越流量とのり面平均水深の関係



※砂分と根層厚はマイナス相関

図-5 耐侵食性と影響因子との関係

4-2 耐侵食性とのり面状態との関係

耐侵食性の評価は、通水開始後よりのり面が崩壊した時点までの累加せん断力をパラメーターとして、のり面の耐侵食性に影響すると考えられる因子との相関関係により評価した(図-5 参照)。この結果、のり面強度、砂分、曲率係数が最も影響が大きく、続いて根が比較的影響があることが判った。

- ・のり面の主植生がチガヤ、もしくは芝であれば、計画ハイドロ程度の越流には十分耐えうることが判った。
- ・のり面の土質が細粒分が少なく、レキを多く含んでいると根層と下層とのつながりが弱く、浸透水により水道が生じ易くなり、崩壊に至る危険性がある。

4-3 詳細な測定による耐侵食力評価

この実験は、4レーンで行い、各レーンで下流側ののり面に代表地点1m×1mの範囲を選定し、10cm間隔（計121点）で侵食深の計測を行った。図-6は、侵食深 Z （計121点の計測結果の平均値）の経時変化を示したものである。このように各流量毎にみると、時間の経過に伴い侵食速度が遅くなり、ある侵食深で安定する傾向が見られた。ある流量における地表面の侵食深 Z と通水時間 t の間には $Z = A \log(t) \cdots (1)$ 式（ただし、 A は芝面の耐侵食性に関する定数）の関係がある。また、図-7は、摩擦速度 U^* の関係を示したものである。摩擦速度の増加に伴い A が大きくなる傾向が見られ図中の直線で近似することができ $A = \alpha(U^* - \beta) \cdots (2)$ 式（ただし、 α は植生の状況に依存する変数、 β は植生に被覆された表土の剝離限界における摩擦速度）の一次関係式が成り立つ。

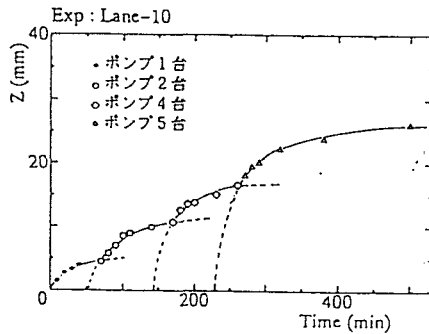


図-6 侵食深の経時変化

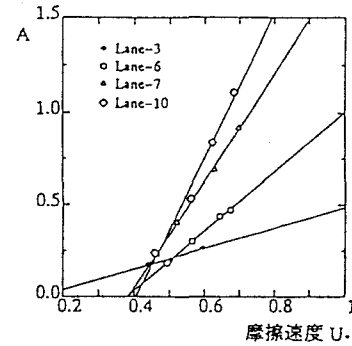
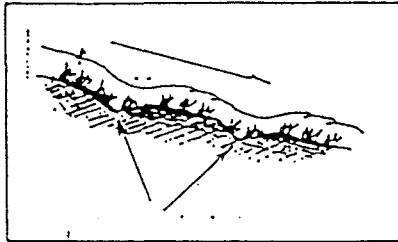


図-7 Aと U^* の関係

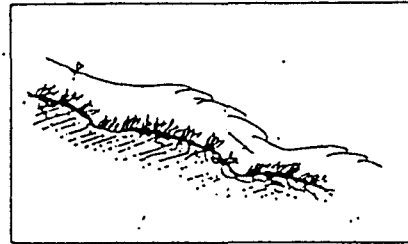
4-4 轍

①



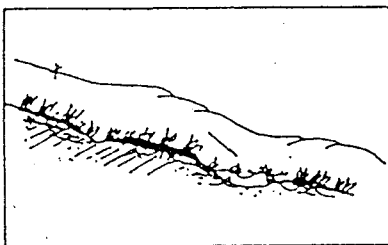
流量が小さい（ポンプ1台程度）場合は、それ程侵食されない。

②



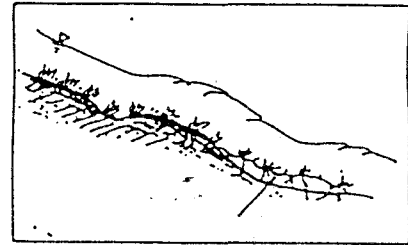
流量の増加に伴い、上流側の轍で剝離した流水が、下流側の轍に衝突する形になる。

③



下流側の轍が削られるように侵食され、芝根が露になる。

④



ある程度侵食されると、一気に下流側に向かって洗掘される。芝根は平面方向のつながりが強いので残留する。

図-8 轍の侵食過程（概念図）

ポンプ3台程度の流量 ($q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$) で上流側の轍で剥離した流水が下流側の轍内、及びその周辺の侵食が一気に進行する傾向が見られた。

4-5 不陸・裸地

一般的な、チガヤ、を主植生とするのり面に越流が生じる場合、まず越流水により葉・茎が倒れ始めて草株周辺の土粒子が剥離し始める。さらに流量が大きくなると、葉・茎は全部倒れ、株周辺の侵食が進み、根毛、根茎が露出する。

4-6 構造物

①流れに対して平行に構造物がある場合

越流後、のり面の流れは横断中央の構造物上に集中するため、構造物脇の植生面上の底面流速は、構造物がない場合の60～70%ほどしか出ず、境界面上ではほぼ同じ底面流速となっている。従って、同じ流量でも通常の植生面上と比較して、構造物脇の植生面上にかかる力は小さい傾向にある（侵食に対する弱点箇所とはならない）。

②流れに対して垂直に構造物がある場合

流下方向に対して垂直に構造物等の固い物質（土質も含む）が入っている場合、それより上流側で侵食が進行し構造物まで広がると、下流側へ侵食がされないために一気に深さ方向に洗掘される。

5. 実験結果における考察

- a) 植生 芝又はチガヤで被度が大きい状態を維持することが望ましい。
- b) 草刈りによる管理 比較的草丈のある方が、越流時草が倒れのり面を保護するため耐侵食性が増すが、草を短く刈った方が植生遷動を防止することになるため、植生状況により以下のような草刈り方法が望ましい。
 - ・芝が優先している場合は、草丈を短く刈る。
 - ・チガヤが優先している場合は、流水により葉・茎が倒れる程度に比較的高めに刈る。
- c) 土質成分 礫分をできるだけ含まず、砂を中心に年度、シルト分がほどよく混ざっているものが望ましい。また、土質が砂・礫中心である場合は、浸透水により根層が剥離し、崩壊まで至る危険性がある。
- d) 不陸・裸地 モグラ穴・草株周囲の不陸が侵食に対する弱点部となるが、のり面勾配が1：3の場合は、チガヤ等の被度が大きく根が密に張っていれば崩壊まで至る危険性は少ない。
- e) 轍 計画ハイドロのピーク時 ($q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$) に下側の轍がのり面崩壊の要因になる危険性がある。
- f) 小堤内の構造物 流下方向に垂直に構造物を作ってはいけない。また、のり面内に局所的に粘土塊等の固形物がないように注意し、施工・管理する必要がある。

6. 越流堤法面の耐侵食評価方法

前項4-3で得られた侵食深 Z と通水時間 t の関係式(1)、(2)式を利用し、植生による越流堤の簡易的な耐侵食評価の方法を提案するものである。

以下に、評価方法の手順を示す。

6. 1 侵食深予測式の算定

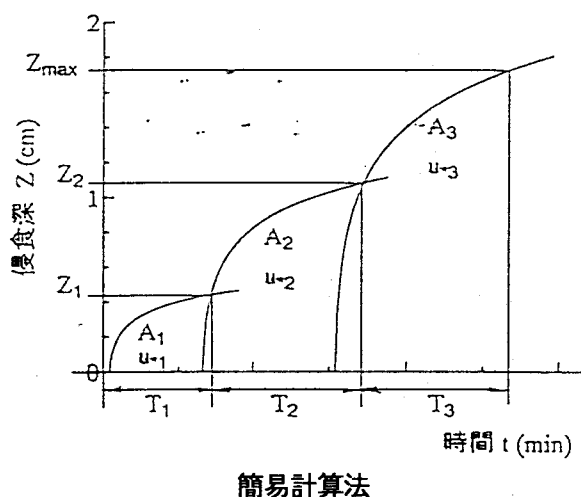
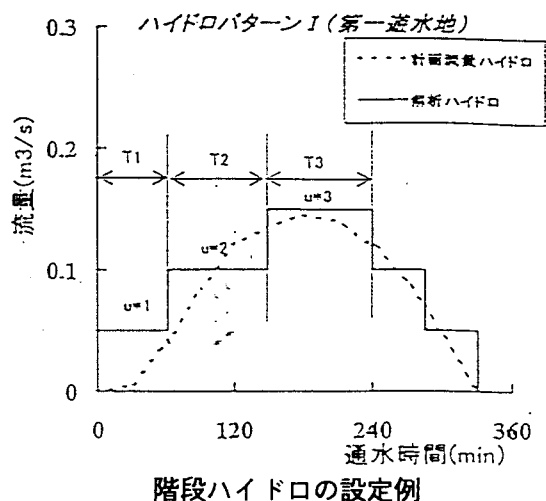
福岡ら¹⁾の見いだした侵食深の経時変化式より、服部ら²⁾は以下のように侵食深の予測式を導き出せるとしている。なお、実際の洪水ハイドロを用いる場合は、摩擦速度は時間の関数 $u^*(t)$ の関数であることを示す。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A}{\ln 10} \exp \left[-\frac{\ln 10}{A} z \right]$$

$$\text{※ } A = \alpha (u^*(t) - \beta)$$

この式は摩擦速度 dz/dt が侵食深 Z と摩擦速度 $u^*(t)$ の関数であることを示す。

ここで、摩擦速度 $u^*(t)$ を代入し、両辺を $t=0$ からハイドロのピーク終了時まで積分することにより、予測最大侵食深が算出されるが、 $u^*(t)$ は特殊な関数形にならない限り解析的に積分することは困難であるため、計画ハイドロを全体の総流量が同じになるように階段状のハイドロとなるように置き換え換え、数値積分を行うものとする。



なお、ピークハイドロが終わる時点での最終侵食深 $Z_{\max}$ は以下の式を用いて逐次算出することが出来る。

$$Z_{\max} = A_n \log (T_n + 10^{Z_{n-1}/A_n})$$

ここに、 $A_n = \alpha (u_n - \beta)$: $n=1 \sim 3$ である。

6. 2 α 、 β の算定

α 、 β は、前段でも述べたように、個々の堤防の植生条件により固有の値を示すものであるが、ここでは算定における考え方を示すものとする。

植生状況に依存する変数である α は、建設省土木研究所で行われた植生の耐侵食実験から、次に様な評価方法が提案されている。図-9は α と平均根毛量 σ の関係を示したものであり、対極的に見て、 α が平均根毛量の増加に伴って減少する傾向が見られる。

土木研究所（服部ほか(1997)²⁾）では、耐侵食性の評価方法が安全側になるように、図中の α の上限値を表す直線から、 α と σ の関係を次式(3)で提案している。

$$\alpha = -50\sigma + 9 \quad \dots \quad (3) \text{ 式 } (\sigma: \text{平均根毛量(g/cm}^3\text{)})$$

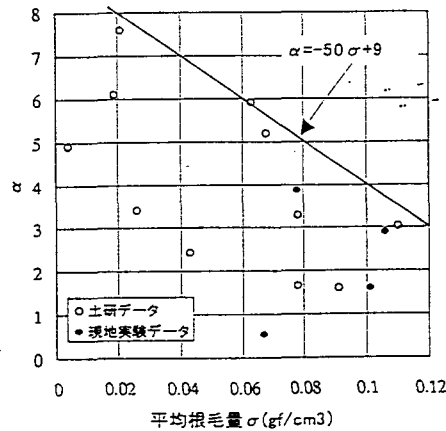


図-9 α と平均根毛量の関係

β の算定においては、表土の剝離限界 ($U^* = \beta$) では、当然法面は侵食されず、これは植生の葉や茎による法面に作用する掃流力低減効果によるものと考えられる。

ここで、図-7に示すように刈り込みを行わなかったレーン3を除くと、 β の値が0.4に集中していることが判る。従って、越流堤の設計時、表土の剝離限界の摩擦速度 U^* を、多少安全側を見て0.3 (m/s) として用いることが可能である。

6. 3 許容侵食深の算定

土木研究所においては、図-10に見られるように摩擦速度27cm/s (断面平均流速で4m/s) 以下において、許容侵食深を $Z_{brk} = 2.0$ cmに設定している。図中に今回の現地越流実験のデータを示しているが、礫が混入し、崩壊が生じたケースを除くと、全て許容侵食深2cm以上となっている。なお、この3ケースは通水停止まで侵食速度の急激な増加は確認されておらず、実際にはもっと深い値になると推定され、許容侵食深 $Z_{brk} = 2.0$ cmは安全側から考えると、妥当な値であると判断される。

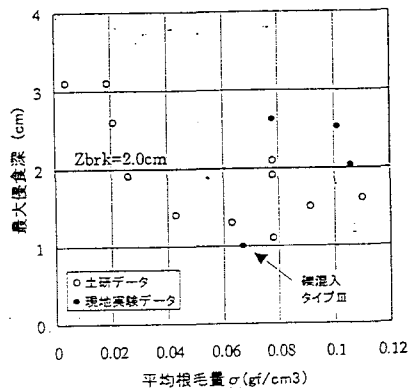


図-10 最大侵食深と平均根毛量の関係

6. 4 耐侵食力の評価

上記項目からも判るように、予測式より算出した、求める区間の侵食深の予測値 Z_{max} と、既に設定した許容侵食深 $Z_{brk} = 2.0$ cmを比較して、許容侵食深以下は安全であり、許容侵食深以上の場合は、設定したハイドロには耐えられないと判断される。

また、逆に設定ハイドロにより、耐える植生法面の植生・根毛量をどの程度維持するかの指標を算定することもできる。

7. 耐侵食評価方法の検証

前項6における耐侵食評価方法を用いて、平成6、7年度現地越流実験の検証を行った。

図-11、12が耐侵食評価方法を用いた崩壊予測時間と実際の崩壊までの通水時間を比較したものである。

この結果、平成6年度で数ケース、予測時間が実際の崩壊時間より遅い場合が見られるが、これは全て法面勾配1：5のケースであった。本評価方法では法面勾配1：3の実験結果を用いて評価しており、勾配の差により表土の剝離限界 β が異なっているためと考えられる。

他のケースは当初設定した $\beta = 0.3$ において、全て予測時間が実際の崩壊時間を下回っており、安全側の評価となった。

従って、法面勾配1：3において、この評価方法の概ねの妥当性が証明された。

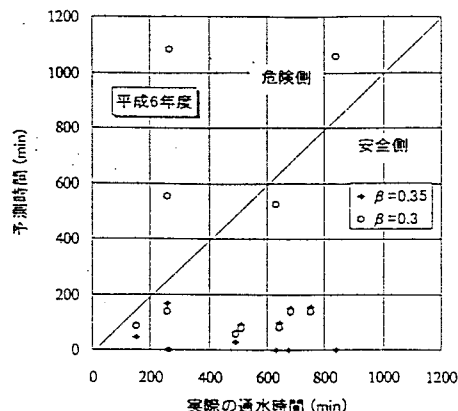


図-11 平成6年度実験結果の検証

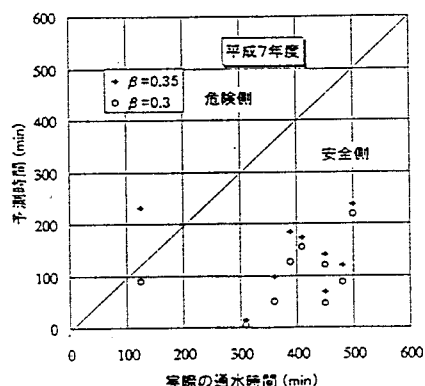


図-12 平成7年度実験結果の検証

土木研究所においては、平坦部の実験を行っており、評価の指標としては $\beta = 0.0$ に設定している。従って、この評価を全堤防形状に反映させるためには、勾配差による β の評価をしていかなければならない。また、図中にも見られるように、予測と実際の崩壊到達時間には相当の開きがあるため、この辺の妥当性も併せて検討を行う必要がある。

8. まとめ

これまでの過去3年間の実験は、一閑遊水池の越流堤として芝堤の安全性を検討するもので、植生堤防の実現性が確認されたと考える。

また、簡易な評価手法であるが、植生の管理面における耐侵食評価とその管理における指標が提示できたものとする。

今後は、これまでの実験結果を踏まえ施工計画や管理計画に反映させるようになるが、実験結果は管理の対象となる堤防法面の一部の事象を捉えたにすぎず、これからは広大な法面を管理する上で管理指標をデータの蓄積と、分析を行いながら、極力簡素な形で設定が可能となるように検討し、堤防の設計・管理に反映させていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 福岡ほか：堤防芝の流水に対する侵食抵抗，土木学会論文集，No. 491
- 2) 服部ほか：植生が繁茂する堤防のり面の耐侵食性，土木学会第51回年次学術講演会