

透水性（排気性）材料を用いた堤防裏法越水強化工法の水理的評価と技術的位置づけについて

HYDRAULIC EVALUATION OF PROTECTION WORK ON BACK SLOPE AS A KIND OF ARMOR LEVEE MADE OF FILTER SHEET AGAINST OVERFLOW

藤田光一¹・末次忠司²・諏訪義雄³・東高德⁴・

白土正美⁵・郡司篤⁶・最上谷吉則⁷

Ko-ichi FUJITA, Tadashi SUETSUGI, Yoshio SUWA, Takanori HIGASHI, Masami SHIRATO, Atsushi GUNJI and Yoshinori MOGAMIYA

¹正会員 工博 国土交通省三重工事事務所（〒514-8502 三重県津市広明町 297 番地）

²正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所（〒305-0804 茨城県つくば市大字旭 1 番地）

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所（ 同上 ）

⁴正会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6）

⁵正会員 国土交通省江戸川工事事務所（〒278-0005 千葉県野田市宮崎 134 番地）

⁶正会員 国土交通省下館工事事務所（〒308-0841 茨城県下館市二木成 1753）

⁷正会員 （株）建設技術研究所（〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1047-27）

We studied a kind of “Armor Levee” against overflow, which has back slope protection work made of filter sheet, through full-scale model experiment. As a result, the protection work on back slope made of filter sheet can make the speed of erosion caused by overflow late, but cannot prevent from erosion on back slope perfectly. It is different from the protection work on back slope made of impervious sheet. The reason why the speed of erosion becomes lower is as follows: Since the filter sheet prevents from overtopping flow from eroding back slope directly and keep a gap between back slope and filter sheet narrow, flow velocity in the gap is lower than the critical velocity for erosion. If this protection work is used, the followings must be carried out: i) Verification of safety for sliding and piping of levee against seepage from filter sheet, ii) Construction management of banking, and iii) Pertinent protection for edge of filter sheet and overlapping part of them.

Key Word: Armor levee, filter sheet, speed of back slope erosion, gap between back slope and filter sheet, velocity under filter sheet, critical velocity for erosion

1. はじめに

現在提案されている越水強化堤防（難破堤堤防）の裏法保護工は、越流水による裏法面への侵食外力の作用を遮水シートによって防止する工法¹⁾である。この工法は、裏法侵食を確実に防止できるものの、遮水シート下の空気を抜くための空気抜き工が必要となり、短期間に大量の施工を行うには課題がある。この課題を解決するため、遮水シート及び空気抜き工に換えて排気性のある透水性材料を裏法保護工に用いることが考えられるが、過去、土木研究所²⁾や河川環境管理財団³⁾において透水性材料を裏法保護工に用いた堤防の越流実験を行った結果、透水性材料は裏法侵食を遅らせる効果はあるものの裏法侵食を完全に防止することはできないこと

が報告されている。

一方、減災システムに資する河川整備という観点からは⁴⁾、遮水シートを裏法保護工に用いた越水強化工法のように、越流水による裏法侵食を完全に防止する工法だけでなく、透水性材料を裏法保護工に用いた強化工法のように越水開始後破堤までの時間を稼ぐ・越水破堤の頻度を減らすという工法についてもその効果を評価し、“強化工法”として位置づけていく努力が必要である。

本研究は、裏法勾配 1/3、高さ 3m もしくは 3.5m の実物大堤防模型で、裏法保護工に吸い出し防止材を用いた越水強化堤防の越流実験を行い、その効果を検討したものである。

2. 実験方法

図-1のような幅2.3m、高さ3m、裏法勾配1/3で、天端保護工（高さ0.56m、ない場合もあり）と法尻にドレーン工を施工した実物大堤防裏法模型を製作し、越流実験を行った。実験は、裏法保護工がない裸地のケース、裏法保護工として吸い出し防止材を用いたケース、裏法保護工に吸い出し防止材を用いてかつ側壁沿いの裏法面を遮水シートで保護したケースの3つのケースについて行った。越流量は、越流水深30cmの一定流量とし、合計3時間を目安に通水を行った。通水の途中で、裏法侵食状況を測定した。実験に用いた吸い出し防止材は、不織布で、透水係数 $k=0.186\text{cm/s}$ 、厚さ $t_g=1.02\text{cm}$ である。

次に、吸い出し防止材下における裏法侵食の外力と堤体土の耐力を把握するため、裏法保護工部分だけの抽出模型を製作し、吸い出し防止材上と吸い出し防止材下の流速を測定するとともに、裏法侵食過程を観察した。また、吸い出し防止材下の流れについて計算を行い、実物大実験で起きた吸い出し防止材下の裏法侵食メカニズムについて考察した。

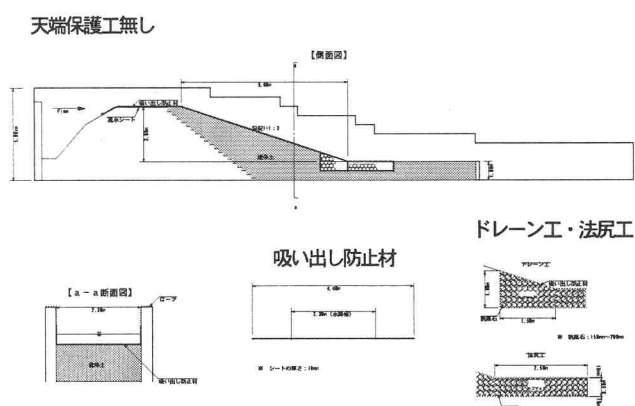
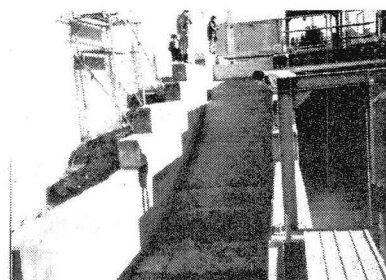


図-1 堤防模型図

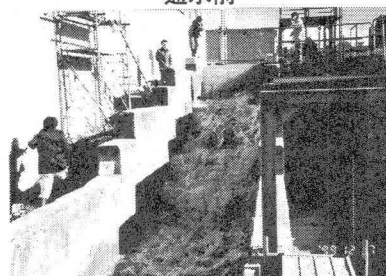
3. 吸い出し防止材を用いた裏法保護工の効果

写真-1は裏法保護工がない裸地のケースにおける裏法侵食の進行状況である。通水15分で天端保護工から越流水が落下する地点とドレーン工上流地点を中心に裏法侵食が進行している。通水30分で堤体裏法の土砂はほとんど流失している。

写真-2は、吸い出し防止材を裏法保護工に用いたケースにおける裏法侵食の進行状況である。なお、この実験ケースでは、天端保護工はない。通水10



通水前



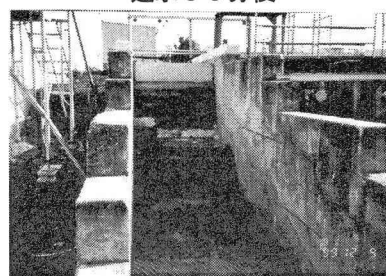
通水8分後



通水15分後



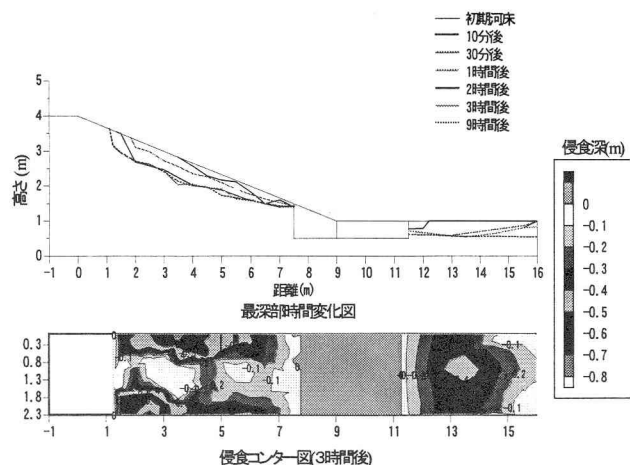
通水30分後



通水後(30分後)

写真-1 裏法保護工が無い裸地ケースの裏法侵食状況

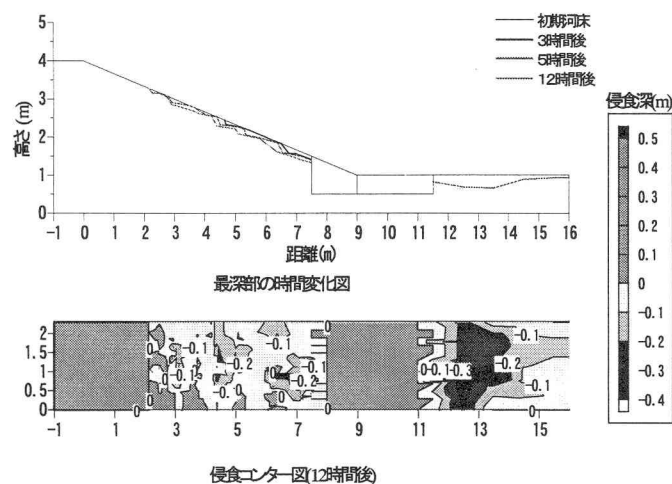
分後から側壁沿いに裏法侵食が始まり、次第に拡大



図－２ 裏法保護工に吸い出し防止材を用いたケースの侵食時間変化（縦断・等高線）図

していく様子がわかる。しかし、180 分通水後でも、堤体はある程度残っており、侵食部分は大きな土塊で覆われている。裏法侵食最深部の時間変化、180 分通水後の裏法侵食状況を図－２に示す。180 分通水した後、通水を続けて合計 9 時間通水しても、裏法侵食は大きく進まなかった。

写真－３は、吸い出し防止材を裏法保護工に用いてかつ側壁沿いの裏法面を遮水シートで保護したケースにおける 180 分通水後の裏法侵食状況である。この実験ケースは、吸い出し防止材の重ね目を見るためのケースであったため、中央部 15cm 部分で左右の吸い出し防止材が重なっている。表面の細粒土砂は流出しているものの、裏法侵食量は小さい。

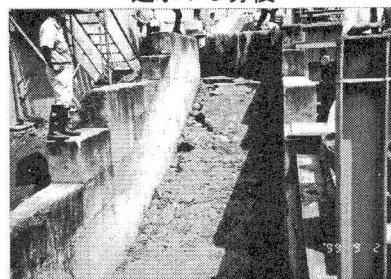


図－３ 裏法保護工に吸い出し防止材使用かつ遮水シートで保護したケース（重ね幅：30cm）侵食時間変化（縦断・等高線）図

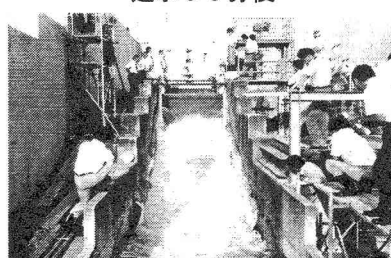
その後通水を続けた結果、210 分経過時には、裏法侵食の進行によって、裏法下部の吸い出し防止材の継ぎ目が開き、急激に裏法侵食が進んだ。なお、同じ条件で吸い出し防止材の重ね幅を 30cm に増やしたケースでは、720 分通水しても、図－３のとおり裏法侵食は小さいままであった。



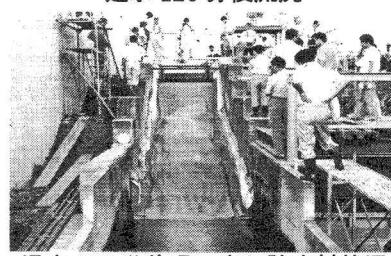
通水 10 分後



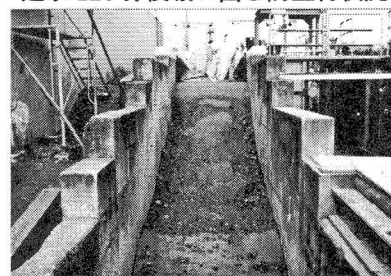
通水 30 分後



通水 120 分後流況

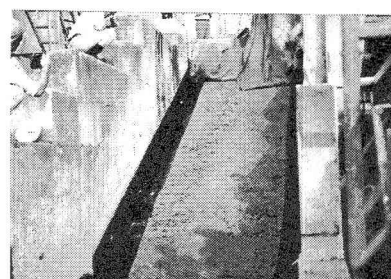


通水 120 分後吸い出し防止材状況



通水 180 分後

写真－２ 裏法保護工に吸い出し防止材を用いたケースの裏法侵食状況



写真－３ 裏法保護工に吸い出し防止材使用かつ側壁沿いを遮水シートで保護したケースの 180 分通水後裏法侵食状況

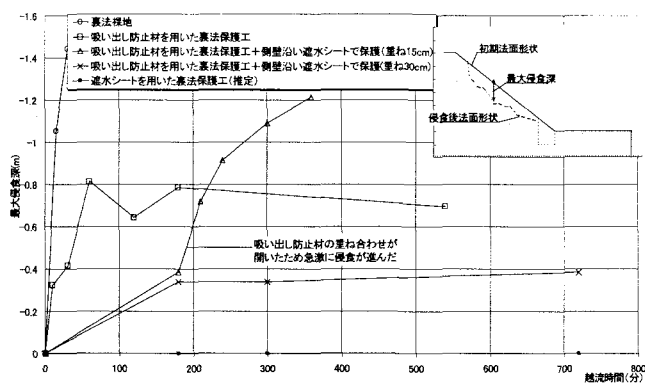


図-4 各ケースの裏法侵食（最大侵食深）の発達状況図

これらの結果を、裏法の最大侵食深の発達状況で整理したものが図-4である。図-4からわかるように、吸い出し防止材を用いた裏法保護工によって、裸地の場合に比較して裏法侵食の発達速度を遅くすることができる。側壁沿いを保護してやればさらに裏法侵食の発達速度を小さくすることができる。なお、図-4には、裏法保護工に遮水シートを用いた場合の推定線も合わせて示した。遮水シートによる裏法保護工では、越流水が堤体裏法面に影響することを完全にシャットアウトするので、裏法侵食の最大侵食深は0のままと推定される。吸い出し防止材による裏法保護工の裏法侵食防止効果は、遮水シートによる効果には及ばないと推定される。

4. 吸い出し防止材の裏法侵食防止効果に関する考察

吸い出し防止材の裏法侵食防止効果について考察するため、実物大実験を行った水路を幅50cmに狭めた裏法保護工部分の抽出模型水路を製作し、吸い出し防止材の上と下の流速を測定した。実験は、越流水深10cm、20cm、30cmの3ケースについて行い、流速はピトー管で測定した。測定結果を図-5に示す。図-5から、吸い出し防止材上の流速は、越流水深の増加とともに増し、最大5m/sになるが、吸い出し防止材下の流速は、越流水深が増加しても変化せず概ね1m/s弱となっている。これは、吸い出し防止材下の流れが平板間流れになっていることを示している。

図-6は、同じ水路で吸い出し防止材下の裏法侵食が発生しやすいドレーン工上流地点（法肩からの水平距離6.5m、7.0m地点）において、越流水深30cm時における吸い出し防止材上下の流速の経時変化を測定するとともに裏法侵食の進行過程を観察した結果である。図-6から、通水開始後時間を経過するにしたがって吸い出し防止材下の流速が増していき、流速1.5m/s以上になると、裏法土の表層侵食が見られるようになる。表層侵食の進行に伴って流速が増加していき、流速2m/s程度になると、土塊が流出する裏法侵食が起きるようになる。図-

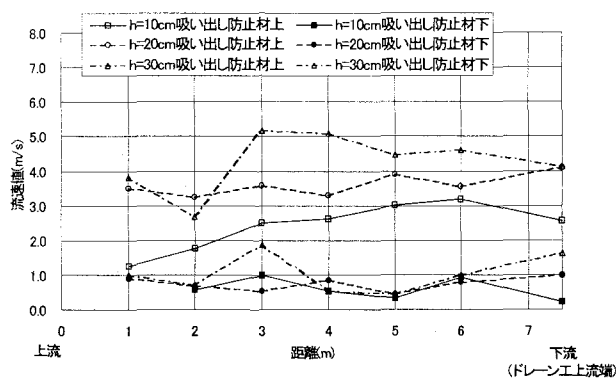


図-5 吸い出し防止材上下の流速測定結果

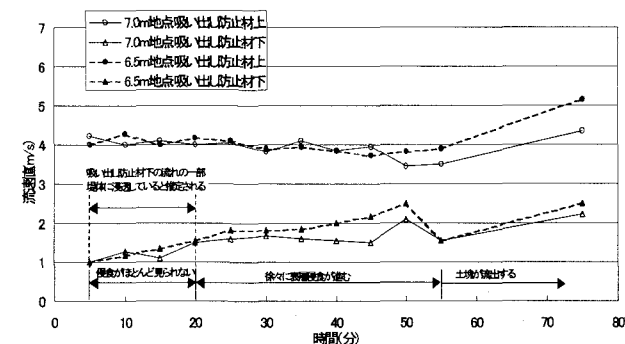


図-6 法肩から6.5m、7.0m地点の吸い出し防止材上下の流速経時変化・裏法面侵食状況

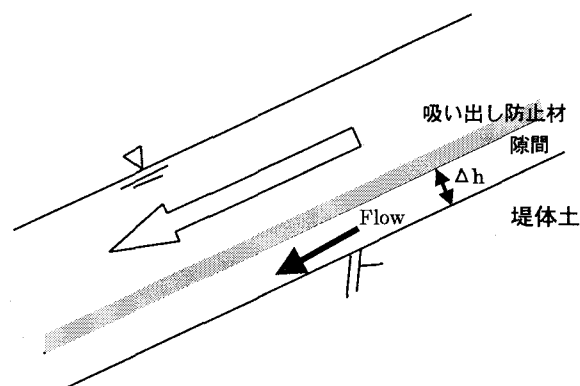


図-7 平板間流れモデル

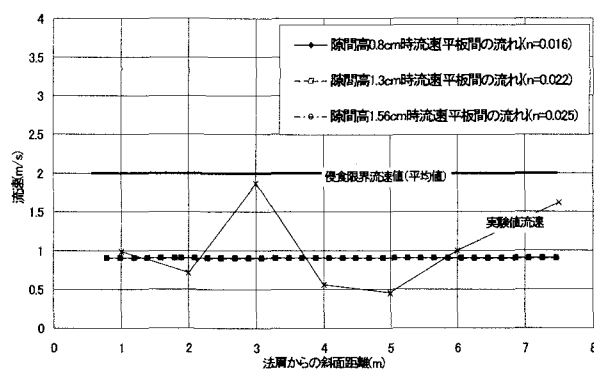


図-8 堤体と吸い出し防止材間の流れの水深と流速の関係

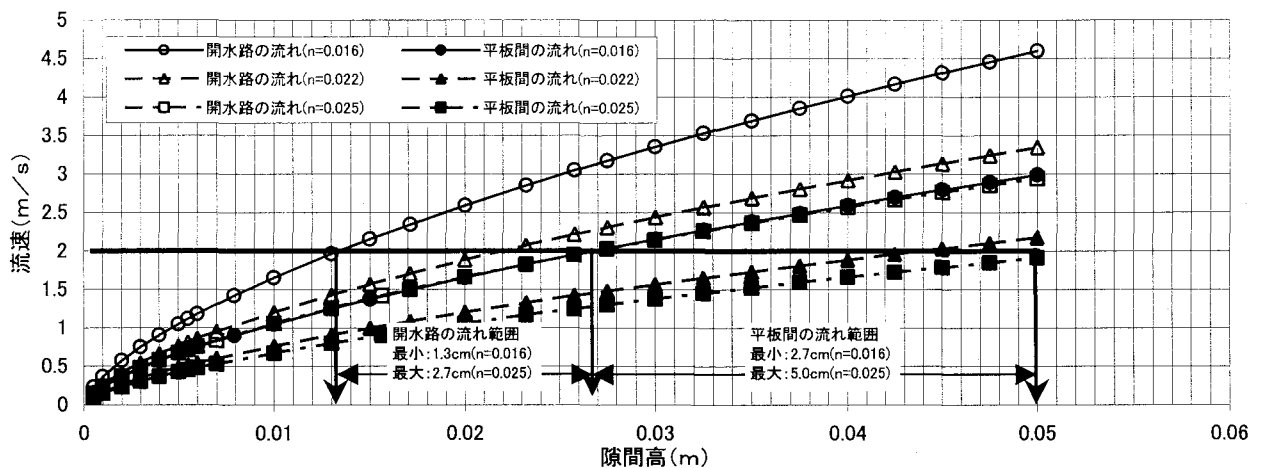


図-9 吸い出し防止材と堤体の隙間間隔・水深と流速

6 から、裏法土の表層侵食が進む流速は 1.5m/s 程度、侵食限界流速⁵⁾は 2m/s 程度と評価できる。

吸い出し防止材下の流れについて、図-7 の平板間流れを仮定して計算を試みる。吸い出し防止材及び堤体裏法土の粗度係数を n として、マンニング式を仮定すると流速 V は、

$$V = 1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

$$R = A/S = \Delta h \cdot B / 2B = \Delta h / 2$$

となる。勾配 I として裏法勾配 1/3 を、粗度係数として 0.016、0.022、0.025 を仮定し、図-5 の流速測定結果に合う Δh を求めると、図-8 のとおり、 $\Delta h = 0.8\text{cm}$ ($n=0.016$)、 1.3cm ($n=0.022$)、 1.56cm ($n=0.025$) と推定され、抽出実験で流速を測定した場所では、吸い出し防止材が堤体裏法に概ね密着した状態であったと考えられる。

次に、吸い出し防止材下の流速が堤体の侵食限界流速以上になる条件を計算してみる。図-9 は、等流を仮定して、吸い出し防止材と堤体裏法土の隙間間隔 Δh と吸い出し防止材下の流速の関係を示したものである。計算は、隙間が平板間流れになった状態と開水路流れの状態の 2 通り行っている。開水路流れの状態では、 Δh は水深である。図-9 から、流速が堤体土の侵食限界流速 2.0m/s 以上となるのは、開水路流れ状態で 1.3cm ($n=0.016$) ~ 2.7cm ($n=0.025$)、平板間流れ状態で 2.7cm ($n=0.016$) ~ 5.0cm ($n=0.025$) 以上の隙間が必要である。

実物大堤防実験では吸い出し防止材が裏法侵食に追いつきやすくするため、図-1 のとおり、吸い出し防止材を両脇の側壁から垂らして設置している。このため、側壁近傍では、どうしても隙間ができやすい。

裏法保護工に吸い出し防止材を用いて、側壁沿いを遮水シートで保護した実験を行った際に、側壁沿いを開水路状態にして、電磁流速計と浮子観測により流速測定を試みた。その結果、側壁沿いの流速は

表-1 裏法土の引張り試験結果

実験ケース	サンプル	σ_{tb} (gf/cm ²)
裏法土	1	12.70
	2	18.00
	3	8.40
	4	9.10
	5	11.40
	6	15.60
	平均値	12.50

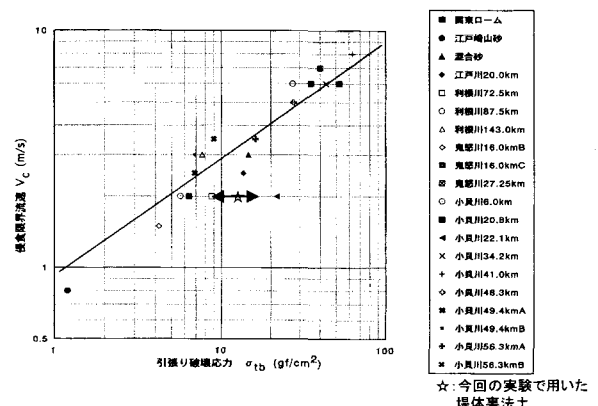


図-10 侵食限界流速と引張り破壊応力の関係

1.5~2m/s であり、図-5 の吸い出し防止材下流速 1m/s 弱よりも大きく、図-6 で推定した裏法土の侵食限界流速に近い値であった。

側壁付近は、堤体模型をつくる際に締め固めにくい場所であることから侵食耐力が水路中央部より小さい可能性も考えられる。

側壁沿いを遮水シートで保護しないケースで側壁沿いから裏法侵食が進むのは、隙間が広く流速が速くなりやすいことと、締め固めにくいことにより侵食耐力が小さいことの両方に起因すると考えられる。

なお、参考に、裏法土について、粘性土の侵食限界流速と土の力学特性（引張破壊応力）の関係を評価するために土木研究所が開発した土の引張り試験⁵⁾を行った結果、表-1に示すとおり、引張り破壊応力は $\sigma_{tb}=12.5(\text{gf}/\text{cm}^2)$ であった。この結果と図-6から推定した侵食限界流速 2m/s を土木研究所で過去実施した各種粘性土の実験結果⁵⁾と比較したものが図-10である。今回の実験に用いた堤体裏法土の侵食限界流速は引張り破壊応力から評価される平均的な値よりも小さめであるが、概ね既往の実験結果⁵⁾のバラツキの範囲内に入っていると評価できる。

5. 吸い出し防止材を用いた越水強化工法の技術的整理

最初にも述べたとおり、遮水シートを用いた裏法保護工は、堤防裏法侵食の外力である越流水によるせん断力を完全にシャットアウトすることから、その確実性は高い。一方、吸い出し防止材を用いた工法は、越流水が堤体土に与える影響をシャットアウトすることはできず、吸い出し防止材から浸透した水が、堤体裏法土を侵食する・堤体の飽和度を高めるなどの影響を与える。これらの影響が許容できる範囲かどうかは強化工法の評価のポイントである。

強化のアプローチにおける両者の違いは大きい。遮水シートによる強化工法が危険要因である外力の作用を排除するアプローチであるのに対して、吸い出し防止材による強化工法は危険要因である外力の作用とその破壊速度を軽減・コントロールしようとするアプローチである。このアプローチは、藤田らの言葉を借りれば「粘り強さ」の強化と言うこともできる⁴⁾。減災システムにおいて堤防の越流破堤に対する実力・機能を評価しようとする場合、この「粘り強さ」の評価は欠かせないであろう。

洪水時の堤防破壊のメカニズムには、越水によるもの、侵食によるもの、浸透によるものに分けられる³⁾。堤防設計指針では、各メカニズムに対して（越水については対策が必要な区間のみ）安全性を照査し、それぞれに対して所定の安全性を確保するよう設計することとしている。吸い出し防止材を用いた越水強化工法においても、越流水の裏法侵食に対して安全であるだけでなく、浸透水によるすべり・パイピング破壊に対しても安全でなければならない。

吸い出し防止材を用いた裏法保護工では、越流水の浸透量が大きいことから、裏法侵食だけでなく浸透水によるすべり破壊についても検討を行った上で採用を決定する必要がある。

もう一つ重要な要因は、堤体特に裏法盛土の施工管理である。吸い出し防止材を用いた裏法保護工では、浸透水による吸い出し防止材下の流れが生じ、

堤体裏法面はこの流れによる侵食速度を遅くするだけの耐力を持つ必要がある。このため、吸い出し防止材を用いた裏法保護工を採用する際には、裏法盛土・保護工の施工管理を徹底する必要がある。

6. 結論

本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- ① 吸い出し防止材を裏法保護工に用いた越水強化工法には、裏法侵食を防止する効果はないが、その進行を遅らせる効果があり、破堤による被害を軽減する構造物として位置づけることが可能である。
- ② その機構は、吸い出し防止材により堤体裏法土に作用する流速を堤体裏法土の侵食限界流速以下にし、裏法侵食速度を小さくするものであり、遮水シートを用いた裏法保護工とは全く異なる。
- ③ 吸い出し防止材を用いた裏法保護工の裏法侵食軽減機能は、吸い出し防止材と裏法土との密着度合いと堤体土の侵食耐力によって決まる。
- ④ 吸い出し防止材を用いた裏法保護工を採用する場合には、吸い出し防止材からの浸透水に対する検討と裏法盛土の施工管理の徹底が不可欠である。
- ⑤ 吸い出し防止材の重ね部分及び施工端部分は弱点となりやすいので、実験等により検討・確認を行った上でその処理方法を決定する必要がある。
- ⑥ 減災システムの整備に向けては、遮水シートを用いた裏法保護工のような堤防破壊外力をシャットアウトする強化工法だけでなく、吸い出し防止材を用いた裏法保護工のような破壊速度を制御する強化工法についてもその効果を評価し、位置づけていく必要がある。

参考文献

- 1) 建設省河川局治水課：河川堤防設計指針、2000.6
- 2) 建設省土木研究所河川研究室・土質研究室：加古川堤防質的強化対策調査報告書、土木研究所資料第2621号、1988.3
- 3) (財)河川環境管理財団：平成10年度施行河川環境に配慮した河道計画技術検討業務報告書、1999.3
- 4) 藤田光一、諏訪義雄：減災システム整備における河川堤防技術、河川技術に関する論文集第6巻、2000.6
- 5) 建設省土木研究所河川研究室：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動、土木研究所資料第3489号、1997.1

(2001.4.16 受付)