

2.4 河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発(1)

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水工研究グループ（河川・ダム水理）

研究担当者：箱石憲昭、坂野章

【要旨】

近年、集中豪雨の発生頻度の増大等による河川堤防の決壊に伴う被害の増加が懸念され、堤防の質的強化に向けた検討の必要性がより高くなっている。河川堤防の破堤は、単一要因でなくいくつかの要因が複合して発生するが、過去の破堤事例から“越水”が主要因であることから、本研究は、洪水流が河川堤防を越水した場合の堤防の耐侵食性を向上させる技術開発を目的とした。これまでの実物大堤防模型を用いた水理実験により、主にシート対策工（堤防裏のりをシートで覆ってその上に覆土を施す）を対象に、越流水深、堤体土、シート設置方法等の種々の条件下での越水時の耐侵食機能を検討した。22年度は研究の最終年度であり、これまでの研究成果を整理し技術資料として取り纏めた。

キーワード：河川堤防、堤防決壊、洪水越流、侵食、強化対策、水理的検討

1. はじめに

平成 16 年の豪雨災害等、河川堤防の決壊に伴う水害の発生により、堤防決壊に対する堤防の安全性強化が強く求められている。堤防決壊の主な原因の一つに越水による侵食があり、堤防の安全度強化のためには、侵食に対する抵抗力の高い堤防を開発する必要がある。河川堤防の越水時の耐侵食機能の評価には河川堤防の構造（形状・質）の把握が必要不可欠であるが、費用や時間、現技術的限界等を考慮すると、長い区間に渡り高精度に河川堤防を調査しその対応策を講ずることは困難である。

以上のことから、①堤体のり表面だけの材料や締固め度を変えるような堤体全体をあまり大きく改変させない効率的対策 ②堤防表面をシート状のもので覆うような（以下、「シート工法」という）堤防の内部構造の影響をあまり受けない効率的な対策等が考えられる。しかし、それらの設計・施工技術は確立していないのが現状である。

本研究は、侵食に対する堤防の強化対策として、越水時の堤防裏のり肩～裏のり尻の侵食を軽減する対策工について、その設計・施工技術を確立することを目的とするものである。

2. 検討内容

2.1 検討方針

2.1.1 検討方法

河川堤防は、“長もの”であり、堤内地に多くの人口

や資産を有していることから、氾濫域全体を対象とした洪水防御として特に重要な河川構造物である。また、堤防は長い歴史の下に築き上げられたものである。したがって、今後の堤防に関する研究方針・内容等を検討するにあたっては、堤防の構成材料が不均一でかつその物性の把握が困難であるということを十分に考慮する必要があると考えられる。以上の観点から堤防に関する過去の論文や情報を収集し、これまでの研究方針の経緯を取り纏め、今後の研究のアプローチや方針等についての方向性を検討した。

2.1.2 堤防に関する研究方針のレビュー

土木研究所（旧土木研究所および国土技術政策総合研究所を含む）における堤防の耐越水性に関する研究経緯の概略を以下に示す。

①新治水方式の提案（昭和 36 年～昭和 53 年）

昭和 42 年羽越災害などを契機として、堤防を強化することで越水しても切れない堤防とするための研究に着手した。

②大型実験の始まり（昭和 54 年～昭和 60 年）

越水堤防（越水しても切れない堤防）に関する大型模型実験（実物大に近い）が行われるようになり¹⁾、越流による堤防の破壊プロセスの検討が行われた。また、越水堤防を導入するにあたっての技術的課題を整理した。

③アーマー・レビーに関する検討（昭和 61 年～平成 3 年）

アーマー・レビー設計指針（案）が作成されるなど、裏法被覆工と法尻工の設計手法が提案され²⁾、加古川や雄物川などでアーマー・レビーの試験施工が実施された。また、芝が張られた法面の耐侵食力の評価方法が提案された。

④ファンティア堤防に関する検討（平成9年～平成11年）

天端工、遮水シート、法尻工、法肩保護工による一連の構造を持ち、越水に対して耐久性があり、破堤しにくい堤防に関する検討が行われた。

2.1.3 破堤原因の事例調査

近年は河川整備等によって直轄河川における破堤事例の件数は減少しているが、昭和41年～昭和51年に発生した直轄河川および補助河川における洪水による河川堤防災害の事例調査（552事例）を再整理すると、その堤防の被災区分は図-1のようになる。同図は、破堤だけでなく破堤に至らなかった“のり面欠壊”等の軽被害も対象とし、それらを溢水の有無によって区分した。これらの分類はほとんどが洪水減水後の結果からの推測であって、洪水の規模・継続時間の如何によっては、いずれも破堤の大事につながりかねないものである。また、単一要因だけでなくいくつかの要因が複合して被災が生じることも考慮すると、図-1は定性的な判断に止めるべきと考えられるが、破堤事例は越水を伴っている場合が多いと判断される。

2.2 土堤の破壊メカニズムの検討

2.2.1 検討方法

越水による破堤のメカニズムとして、土堤の耐侵食の支配的な要素を抽出しその影響度についてこれまでの水理実験データ等から分析した。

2.2.2 土堤の破壊メカニズム

土堤の破壊メカニズムの一環として、種々の堤体条件を有する既往の裸堤（対策無）の越水実験データを収集し（表-1参照）、土堤の侵食状況の経時変化等を把握した。

表-1は、実物大の土堤模型（裸堤）を対象とした越水実験の検討ケースであり、このうちNo.2、No.11、No.31は、昭和54年～58年に実施したケースで、No.69～No.92は平成15年～18年に実施したケースである。堤防模型の大きさや堤体材料は両者で異なっているため、これらから厳密な比較検討は困難であるが、本検討の目的である「裸堤の越水時の支配要素を把握する」という観点から

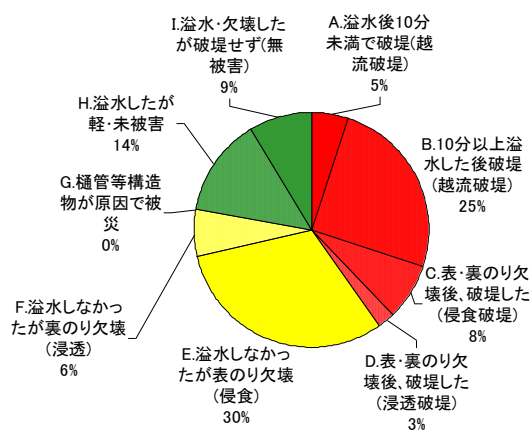


図-1 堤防の被災区分

は貴重な比較検討データが得られる。

図-2と図-3は、侵食量と堤体材料について表-1の全ケースを比較した結果である。図-2の縦軸は、単位幅侵食量として、土堤の天端～裏のり尻付近までの総侵食量を水路幅で除した値を示した。横軸は、単位幅累積越流量として越流量の累積値を水路幅で除した値を示した。これより、裸堤と一口に言っても材料（粒径）、締固め度、飽和度（湛水有無）によって越水による侵食量に限られたケースだけで見ても数十倍程度の開きがあることがわかる。

図-3は、先の全ケースの内、ケースNo.73、No.81とケースNo.83、No.85について、締固め度、飽和度、越水深について侵食への影響を比較したものである。縦軸および横軸の定義は図-2と同一である。これより、堤防の侵食量は同一材料でも締固め度及び飽和度によって3倍～4倍程度異なることが分かる。

また、ケースNo.73、No.81は、実験途中で越水深を $h=0.3\text{m}$ から $h=0.45\text{m}$ に増大させているが、侵食量と越流量の関係はほぼ同一であった。このことから、堤防天端に不陸（延長方向）がある場合の凹部では、越水深が大きくなり流れが集中するため、堤防の侵食が助長される可能性が高くなると考えられる。

以上のように、堤体条件（材料、締固め度、飽和度、越水深）によって、堤防越水時の侵食量は大きく異なることから、築堤時の施工管理だけでなく通常時の維持管理（天端不陸等の有無）についても適正な実施が重要である。

2.3 シートの揚圧力に対する安全性の検討

2.3.1 実験的検討方法

堤防の越水時の耐侵食機能を向上させる一対策として、堤防天端～裏のり尻にかけて吸出し防止シート等で覆うことにより耐侵食機能が向上され³⁾、本検討においてその耐侵食機能は堤体やシート等の条件により大きく変わることが確認された。しかし、懸案事項として、堤体内部の空洞等の存在による堤体内部の空気や水の圧力がシートの安定性についての検討は不十分であることから、これについて実験により検討した。

本検討に使用した模型は、**図-5** に示すように、高さ3.5m、幅4.8m、裏のり勾配1:3の堤防模型の表面をモルタル固定床とし、その内部に堤体を貫通する空洞を造り、河道内水位の上昇に伴ってシート（遮水シート）に空気

圧や水圧が直接働く条件として、河道側から裏のり尻付近に抜ける空洞を、塩ビ管でモデル化した。実際には、シートの上に覆土が施工されるが、当実験で危険側の条件を考えて覆土無しの条件とした。

2.3.2 実験検討結果

実験結果は以下の通りである。

- 空気圧の影響については河道側水位の上昇に伴って堤体内空洞の空気が圧縮されるものの、シートの膨れや振動は生じず、越水後もその状況は殆ど変わらない。
- 水圧の影響については、**写真-1** に示すように越水直前には河道側と裏のり出口部のエネルギー水頭の上昇に

表-1 大型堤防模型実験検討ケース

ケースNo.	堤体条件						水路幅	単位幅流量 (m ³ /s・m)	通水時間 (分)	侵食量 (累積侵食量/ 累積越流量)				
	材料	湛水有無	締固め度	裏のり勾配	天端幅	堤防高								
2	小貝川土砂① (dm≒0.014mm)	有	低 (Dcは不明)	1:2	4m	2.5m	5.0m	0.41 (h≒35cm)	4	8.6%				
11	江戸崎山砂 (dm≒0.2mm)	有	低 (Dcは不明)					0.21 (h≒25cm)	5	13.4%				
											2.3m	0.56 (h≒45cm)	2	8.7%
												0.85 (h≒55cm)	0.5	9.3%
31	小貝川土砂② (dm≒0.15mm)	有	高 (Dcは不明)	1:3	3m	3.5m	4.8m	0.2 (h≒25cm)	15	3.5%				
69	dm≒0.2mm	無	高 (Dc≒90%以上)					0.26 (h≒30cm)	60	0.5%				
											73	dm≒10mm	無	高 (Dc≒90%以上)
81	無	低 (Dc≒80%程度)	0.26 (h≒30cm)					30	2.1%					
										83	dm≒2mm	有	高 (Dc≒90%以上)	0.48 (h≒45cm)
85	無	高 (Dc≒90%以上)	0.26 (h≒30cm)					4	6.6%					
										92	無	右Dc≒90%程度	0.48 (h≒45cm)	7
92'	無	左Dc≒85%程度	0.26 (h≒30cm)					9	4.7%					
										30	0.9%			
5	14.1%													
		22.9%												

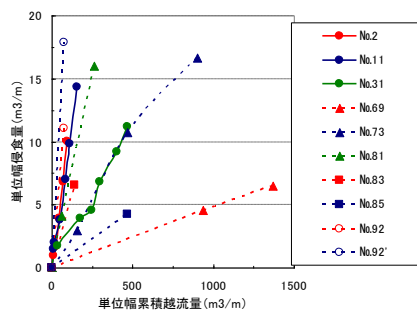


図-2 越流量と侵食量の関係

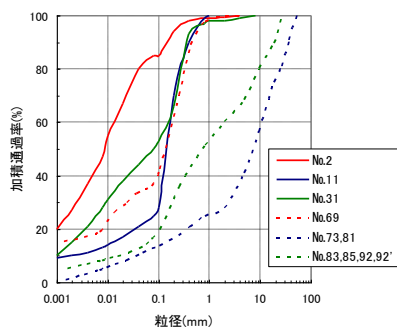


図-3 堤体材料の粒度分布

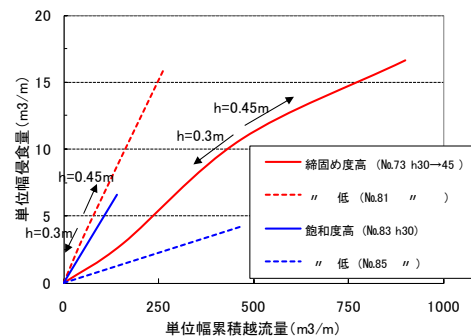


図-4 堤防状態及び越水深の影響

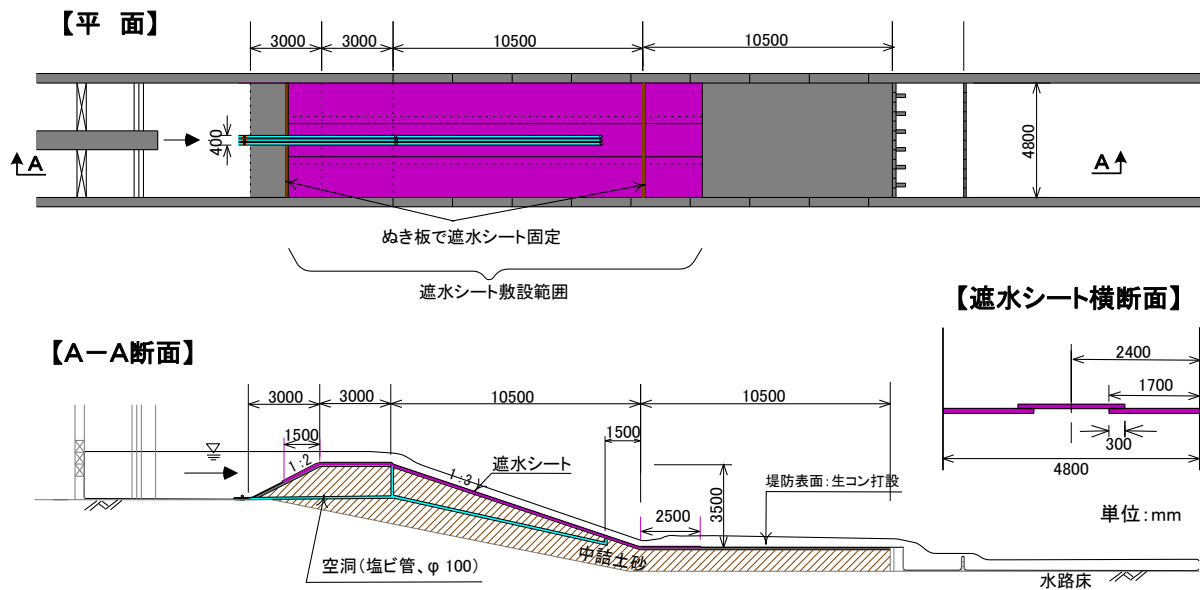


図-5 実験施設詳細図

応じてシートにかかる揚圧力が大きくなりシートが膨れも大きくなり、重ね部の重ね代が少なくなったもののシートがめくれるまでには至らない。越水状態では、裏のり上部からの流れは膨らんだシート部で流れが阻害されるが、流水による下向き圧力がシートに作用することによってシートのめくれは若干小さくなり、膨らんだシートの頂部は水中に没した状態となる。越水深(越流量)が大きくなってもこの状況はあまり変わらない。

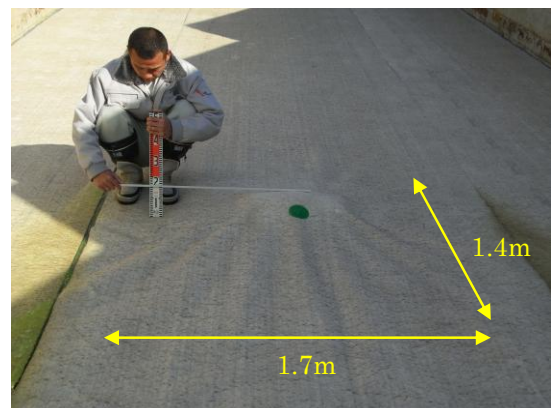


写真-1 流出水によるシートの膨れ状況

2.3.3 理論的検討方法

堤防裏のりをシートで覆った場合のシートの揚圧力に対する安定性について、最も危険側の条件として、堤防満杯水位(越流直前)で堤防下部～堤防裏のりに“空洞”と空気層が形成され、透水性のないシート(遮水シート)によって空気と水が空洞部に閉じこめられた状態を想定した(図-6)。

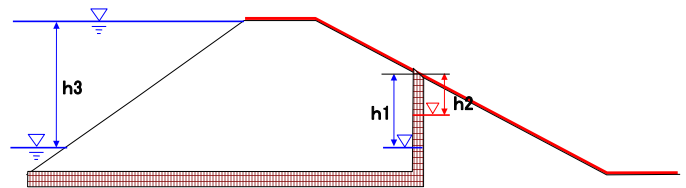


図-6 解析条件

2.3.4 理論的検討結果

図-6 に示す条件における遮水シートにかかる揚圧力を次のように算定した。

堤防裏のり面上の遮水シートは剛体でかつ空洞の中に空気が存在し、その空気は漏れないものとし、堤体内に河川水が浸透しないという条件とした。この場合、河川水位の上昇量(h_3)に応じて遮水シート直下の空気は圧縮され、空洞内の空気の厚さは h_1 から h_2 になるとす

ると、これらの関係式は次のとおりである。

$$h_2 = \frac{1}{(h_3 / 10.33) + 1} * h_1 \dots\dots\dots(1)$$

(1)式の定数 10.33 は、1気圧(1atm)の水柱(m)であり、遮水シートにかかる揚圧力は h_1 / h_2 (atm)となる。この式からわかるように、空洞の中での空気によ

る揚圧力は河川水位に依存することになり、遮水シート下に大量の空気が閉じ込められると（大きな空気溜まりが発生）、遮水シートが押し上げ捲かれて、そこに越流水が集中すると急激な侵食の進行へ結びつくと考えられる。対策として空気溜まりが発生しないように排気装置を設けることが考えられるが、排気管が詰まった場合等の不測の事態の発生時には、排気層の空隙部の空気が災いし空気溜まりを助長させるリスクも併せ持っていると考えられる。

上記のような揚圧力に対する遮水シートの力学的安定性について考える。堤防を越流していない状態で、裏のり面上の微少部分について図-7のように静力学的に釣り合った条件を考えると、以下の式が成り立つ。

$$W \sin \alpha = \delta \tan \phi \quad (\delta = P_1 - P_2 + W \cdot \cos \alpha) \quad (2)$$

ここに、 W ：遮水シートの自重により下向きに作用する力

$$= \gamma_s \cdot t_h / \cos \alpha \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

γ_s ：遮水シートの単位体積重量（ kgf/cm^3 ）

α ：裏のり勾配（ $^\circ$ ）

$P_1 - P_2$ ：遮水シートに作用する力（負で揚圧力）（ kgf/cm^2 ）

$$P_2 : h_1 / h_2 * \gamma_a \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

h_1 / h_2 ： h_3 に応じて（1）式より求めた値

$$P_1 : 1 \text{ 気圧時の圧力} = 1 * \gamma_a \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

γ_a ：空気の単位面積圧力= 1.03 kgf/cm^2

$\tan \phi$ ：遮水シートとのり面との摩擦係数

遮水シートが、閉じこめられた空気圧によって押し上げられないようにするには、(2)式を変形した以下の式を満足するようなシート材料とする必要がある。

$$P_2 - P_1 < W \cos \alpha - \frac{W \sin \alpha}{\tan \phi} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式によって求まるのは、遮水シート下の一面に空気層（排気層など）があり、かつシートが拘束されていない状態を想定した揚圧力に対する安全性である。遮水シートは堤防天端から裏のり尻方向に幅2mの帯状に設置されることを想定すると、計算結果で遮水シートの安定性が得られなくても、揚圧力に対して十分な安全性を有する場合が考えられる。検討の一例として、空洞の大きさと堤防の高さに応じた揚圧力（ $P_2 - P_1$ ）とシートの重さによる押し下げる力（ W ）を図-8に示す。計算に当たっては、のり尻地点に直径 $\phi 1 \sim 20 \text{ cm}$ の空洞（空気孔）があり、河道内水位上昇に伴って揚圧力が増大し、図-7に示す力でバランスするものとした。また、遮水シート（重さ： 2.53 kgf/m^2 ）は、裏のり肩～のり尻に上載さ

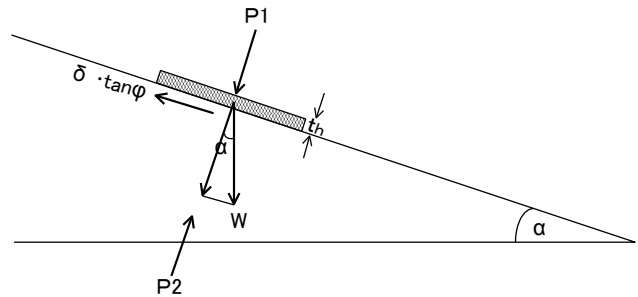


図-7 のり面上に置かれた遮水シートの力学安定条件

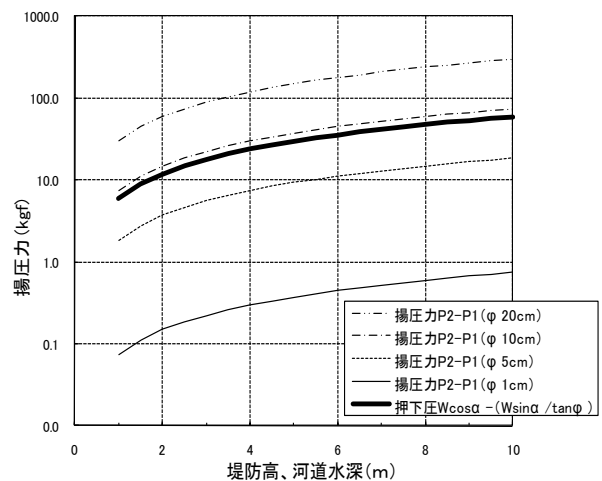


図-8 空洞の大きさによる遮水シートの安定性

れている（摩擦係数 $\tan \phi$ ： 30° ）剛体として扱った。

空洞が $\phi 10 \text{ cm}$ 程度以上で一連の遮水シートが押し上がる計算結果であるが、実際には次のような理由から、遮水シートの安定性は計算結果よりも安全側と考えられる。①遮水シートは剛体ではないため、揚圧力により押し上がったとしてもその箇所は限定される。②遮水シートの重ね部から空気が漏れるため空気溜まりの大きさは限定される。③越流等によって遮水シートが水分を含めばシートを押し下げる力が增加する。

実物大模型（固定床模型、水位差1.5m、空洞孔 $\phi 10 \text{ cm} \times 3$ ）を用いて上記の確認実験をしたが（H19年度実験）、遮水シートの膨らみはほとんど発生せず、十分な安定を有していた。

一方、空気溜まりが形成されずに空洞が水で満たされた場合にも、水圧による遮水シートを押し上げる力は空気圧の場合と同一計算結果となる。しかし、水は空気よりも遮水シート繋ぎ部から流出しにくいことから、遮水シートが押し上げられる可能性は空気の場合より高いと考えられる。これについて、実物大模型実験で確認済みである。

一方、越水後は越流水によって遮水シートを上から押

さえる力が働くため、遮水シートが押し上げられにくくなる。実物大模型実験によると遮水シート繋ぎ部（溶着せず重ねた部分）から流出する水量が越流前に比較して少なくなり、遮水シートを押し上げる現象が局所的となる傾向が強まった。この理由は、揚圧力よりも越流水の水圧が卓越し遮水シート繋ぎ部が押しさえられたことが考えられる。一方、吸出防止シートを同様に用いた実験では、越流の有無や越流水深にあまり関わらずシートの押し上げ高さはほぼ一定であり、シート素材の透水性の違いによってシートの押し上げ高さが異なることを確認した。

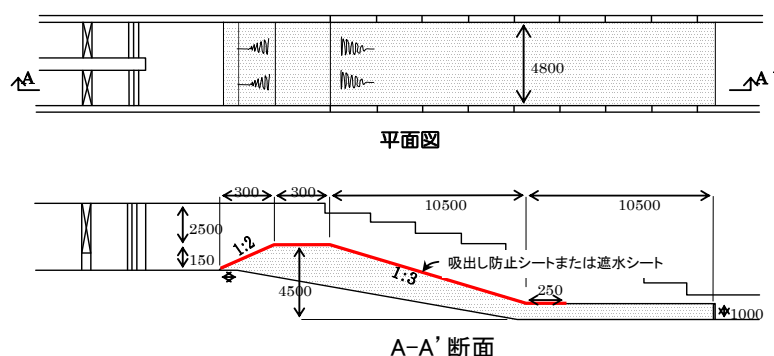


図-9 堤防模型の概要

2.4 シートの設置方法およびシート材料の検討

2.4.1 検討方法

吸出防止シート繋ぎ部の構造およびシート材料（吸出防止シートと遮水シート）の堤防の耐侵食に及ぼす影響について、実物大堤防模型を用いた実験により検討した。堤防模型は、粒径 $d_{60} \approx 2\text{mm}$ の混合砂（透水係数 $k_s \approx 10 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ）を用い、図-9 に示す高さ 3.5m、裏のり勾配 1:3、天端幅 3m である。シートは吸出防止シート（透水係数 $K_s = 1.4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ ）を堤防長手方向に直角に堤防天端から裏のり尻に敷設するが（吸出防止シートは幅 2m 単位でロール状態で商品化されている）、幅 2m 以上の範囲に敷設するには、隣り合うシートの繋ぎ部を溶着または重ねるかの必要がある。

2.4.2 検討結果

図-10 に、堤防裏のり面の時間当たりの堤体の平均侵食深（侵食速度）として、吸出防止シートを用いた実験とともに裸堤と遮水シート（繋ぎ部を重ねただけのケース）を用いた実験との比較を示す。これより次のことがわかった。①吸出防止シートの繋ぎ部を重ねた場合、重ね幅（15cm と 30cm）にあまり関わらず、堤体の侵食速度は無対策（裸堤）の数分の一程度に低減する。②吸出防止シートの繋ぎ部を溶着すると、溶着しない場合に比べ侵食速度が低減する。③遮水シートを用いると（繋ぎ部を溶着させない）、吸出防止シートの同一条件よりも大きな侵食速度を示す。

遮水シートのケースでは、水路側壁沿いで侵食が顕著性である（写真-2）。遮水シートは、水路側壁に接着させず側壁との隙間を極力小さくするように堤体のり面に直に設置した。したがって、一度僅かの隙間から越流水

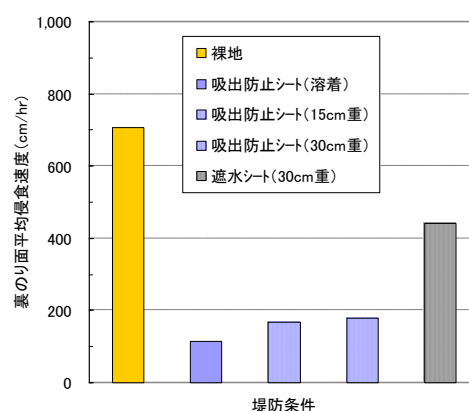


図-10 堤防模型の概要

が遮水シート下に入り込むと、“堤体表面の侵食” → “隙間の拡大” → “流入量の増加” が繰り返され、堤体の侵食が助長されるものと考えられる。

堤体と越流水を完全に分離する遮水シートのような素材で堤防表面を覆った対策には、不測の事態（シートの破損、繋ぎ部の隙間の増大等）が生じると、繋ぎ部等への流水が集中し、堤体の侵食危険性が高まると考えられる。

2.5 シート工法の表層崩壊防止効果の検討

2.5.1 検討方法

シート工法は、堤防裏のり面にシート（吸出防止シート）を敷くものであるが、環境・景観面等を考慮すると、シート上に「覆土」を施し、その表面を芝等で覆うことを基本とすることが妥当と考えられる。

一方、現地の新規堤防において、「降雨時に表層崩壊が発生した事例がある。表層土が降雨により水分を含み、表層土の滑動力が堤体土との境界部におけるせん断抵抗力を超えたことが主な原因と考えられている。

これら堤防のり面の表層崩壊の規模は、深さ方向最大50cm程度で、堤体規模と比較すれば微少ではあるが、堤防天端を道路として併用している場合や堤防脇に側道等がある場合等を考慮すると、この表層崩壊は人的被害に直接結びつく重大な事象であるといえる。また、堤防表のり面で表層崩壊が生じると、そこが洪水時に水衝部となる可能性が高まる。さらに洪水流が増大し、裏のり表層崩壊部に流水が集中した場合を想定すると、堤体崩壊が助長されて大災害に繋がる可能性も考えられる。

本研究の目的は、表層崩壊のメカニズムを詳細に把握



写真-2 遮水シートによる越水対策実験

表-2 実験ケース一覧

ケースNo.	目的	検討内容	模型条件				測定項目			備考	
			対策無	対策有	堤体締固め	表層締固め	降雨	形状	水分		観察
実験 1-1	・堤防のり面の表層崩壊メカニズム把握	累加雨量・降雨強度と表層崩壊との関係	○		約96%	約89%	20~160 (mm/hr)	○	○	○	堤体土 $d_{60} \cong 2\text{mm}$ = 表層土
実験1-2				○				○	○		
実験2-1	・シート対策の表層崩壊への影響	表層崩壊発生時の堤防条件(土羽材料、締固め度等)	○		約92%	約60%	70 (mm/hr)	○	○	○	堤体土 $d_{60} \cong 2\text{mm}$ 表層土 $d_{60} \cong 0.6\text{mm}$
実験2-2				○				○	○		
実験2-3				○				○	○	○	

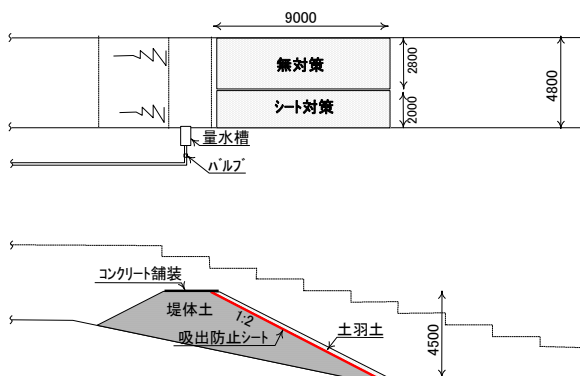


図-11 実験装置概要 (実験 1)

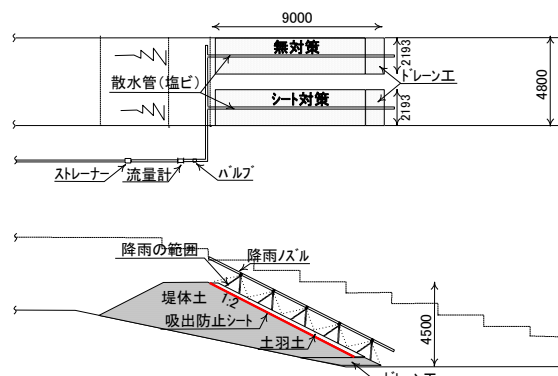


図-12 実験装置概要 (実験 2)

することではなく、「シート工法」の覆土（以下「表層土」という）部分の表層崩壊に対する安全性を確認することにある。したがって実験方法は、表層崩壊の発生条件を試行錯誤的に求め、「シート工法」の有無による表層崩壊の相違を比較することとし、最終的に表-2に示す実験ケースについて図-11、図-12に示す実験装置を用いて検討した。図-13に示す粒度の土を捲出厚30cm、締固め度約92~96% (RI値)で堤防本体(のり勾配1:2)を造り、その上を同図に示す粒度の表層土30cmの厚さで覆って表-2に示す値(RI値)に締固め、対策として透水係数 $k_s = 1.4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ の吸出防止シートを用い、これを堤体土と表層土の間に敷き詰めた。降雨条件の与え方については、堤防天端～のり面への降雨量(20mm/hr～

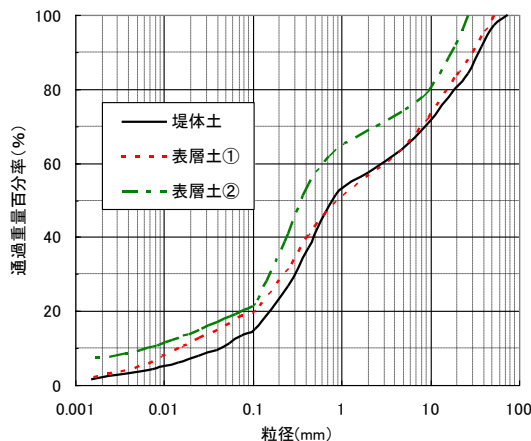


図-13 堤体土および表層土の材料

160mm/hr) に相当する分の水量を堤防天端から供給したケース (実験 1) と、裏のり面への降雨装置による降雨 (約 70、120mm/hr) としたケース (実験 2) の 2 通りとした。

測定項目は、形状変化、表層土および堤体土の水分、支持力、状況観察である。

2.5.2 検討結果

〈表層土①の結果 実験 1〉

降雨強度 20mm/hr の降雨に相当する流量を 5～7 時間/日として 6 日間断続的に累計 34 時間与えたが、対策有無どちらのケース (実験 1-1、1-2) においても、裏のり表面の侵食は殆ど認められなかった。続いて、降雨強度 40mm/hr、60mm/hr、70mm/hr、100mm/hr、160mm/hr の降雨の相当する流量をそれぞれ

積算降雨量が実験 2-2 とほぼ同様の降雨約 13 分の時点で



写真-3 堤防裏のり面状況比較 (30分降雨後)

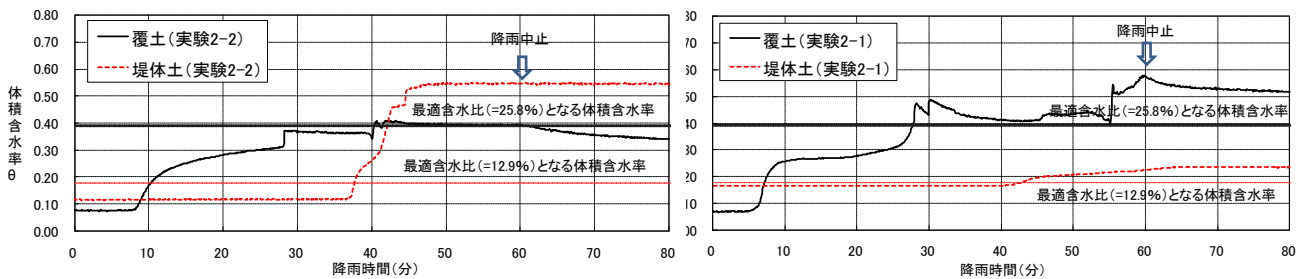


図-14 体積含水率の時間変化 (実験 2-1、実験 2-2)

れ 6 時間、6 時間、5 時間、6 時間、5 時間を加えたが、シート工の有無にあまり関わらず、裏のり表面に小規模のガリ侵食が確認された程度で、表層崩壊には至らなかった。

〈表層土②の結果 実験 2〉

降雨強度 70mm/hr で 30 分降雨後の裏のり面表層の状況を写真-3 に示す。シート対策の有無に関わらずこの写真撮影の直前に団塊的に表層崩壊が発生した。一連の表層崩壊の発生前には、堤防天端肩法線に平行にクラックが発生し、そのクラックがある限界値に達した時点で、裏のり面の表層土が流動化した。

図-14 に表層土中と堤体土中に設置した土壤水分計の経時変化データを示す。70mm/hr の降雨 28 分後付近で表層土の体積含水率が急増して土中水分がほぼ飽和状態になったことが分かる。これは前述の表層崩壊が一気に始まるタイミングとほぼ一致している。

降雨強度の影響を把握するために、シート対策した堤防模型で 120mm/hr の降雨実験をした。降雨強度が大きくなると、ガリ侵食の発生が顕著になりその部分に雨水の殆どが集中してのり面を流れ下る傾向が強くなるものの、

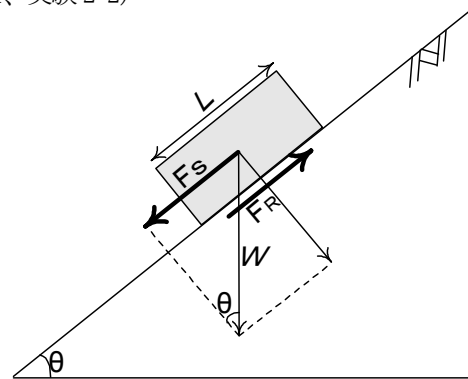


図-15 堤防のり面にかかる力

団塊的に表層崩壊が発生した。

以上のように、シート対策をした場合の表層崩壊の発生可能性は、降雨強度にはあまり関わらず、シート対策無しに比較して低下しないことが実験で確認できた。

実験における一連の現象は、表層土塊に水が浸透して間隙水圧が上昇し、表層土塊の滑動力がせん断抵抗力を超えたことにより生じた次に示すような表層崩壊と考えられる。図-15 のような、のり表面の様な含水比を有する土塊の力学的のバランスを考えると、

$$F_R = (w \cdot \cos \theta - U \cdot L) \cdot \tan \phi + C \cdot L \quad (4)$$

$$F_S = w \cdot \sin \theta \quad (5)$$

ここに、 F_R :抵抗力、 F_S :滑動力、 w :単位長当たりの土塊重量、 θ :すべり面勾配、 U :間隙水圧、 ϕ :内部摩擦角、 C :粘着力、 L :滑り面長さである。

表層土の浸潤線の上昇に伴い、(4)式の U が増大し、 F_R が低下する。 $F_R/F_S \leq 1$ の条件となって表層崩壊が発生に繋がるのが基本的なメカニズムと考えられる。

以上の観点から、本実験の結果を考察すると概略次のようになる。

表層土①の実験1では、長時間の降水にも関わらず(ほぼ飽和状態)、対策有無の両ケースで表層崩壊が発生しなかった主な理由は、間隙水圧 U があまり増大しなかった。つまり、表層土の締固め度が高く、 $F_R/F_S \geq 1$ の条件が保持された結果と考えられる。

一方、表層土②の実験2では、表層土が流動化して崩壊したことから、滑り面の内部摩擦角 ϕ の影響はあまり支配的ではなく、表層土の締固め度が低いことにより表層土塊の間隙水圧 U が増大したことが支配的で、 $F_R/F_S \leq 1$ となって表層崩壊に至ったものと考えられる。

2.6 部分的な対策

2.6.1 検討方法

土堤の場合には、越水時の堤体の耐侵食機能にとって堤体の締固め度と飽

和度が重要な支配要素であり、新規に築堤する場合や既設堤防を全て取り払って堤防を更新する際には、これら

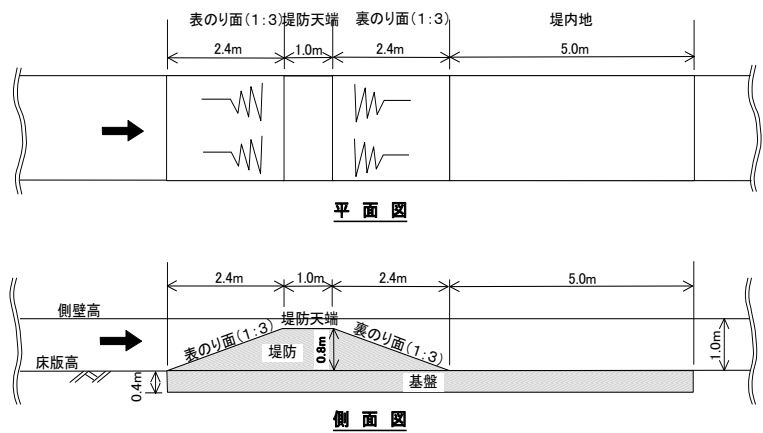


図-16 実験装置概要 (実験1)

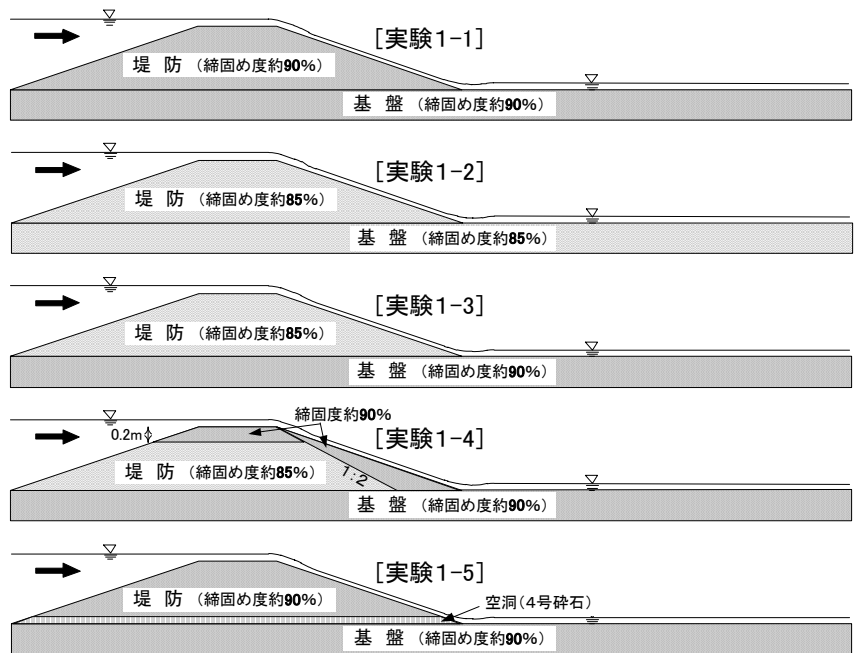


図-17 模型条件 (実験1)

表-3 実験ケース一覧 (実験1)

ケースNo.	堤体条件						水路幅	越流水深 (cm)	通水時間 (分)	侵食量 (累積侵食量 / 累積越流量)	
	材料	締固度		その他	裏のり勾配	天端幅					堤防高
堤体		基盤									
実験1-1	dm ≒ 2mm	高締固め	高締固め		1:3	1m	0.8m	2.0m	h=5cm	30	0.51%
実験1-2		低締固め	低締固め							5	7.41%
実験1-3		低締固め	高締固め							10	3.25%
実験1-4		天端と裏のりのみ高締固め	高締固め							25	1.37%
実験1-5		高締固め	高締固め	堤体内空洞有						15	2.18%

2.4 河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発(1)

の要素に留意することが必要である。しかし、現実に新規または堤防の更新の際には長い区間に至るほど経済的な負担が多くなることから、現況堤防の特性に応じた部分的対応にならざるを得ない。越水時の耐侵食機能として特に空間的な現況堤防の特性状況を把握するための調査は、精度的・コスト的にまだ非効率な部分が多いことから、現況堤防を大きく改変させない経済的で現実的な対策の検討が必要である。実験は、**図-16**に示す幅2m、長さ15m(長さ4m、高さ1.5m)の水路片側側面の一部がアクリル製で、側面からの観察が可能)、深さ1.4mの水路内に、粒径 $d_{60} \approx 2\text{mm}$ の混合砂(透水係数 $k_s \approx 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)を用い、高さ0.8mで表のり面(1:3勾配)～天端(1m幅)～裏のり面(1:3勾配)についての堤防模型を作製した。なお堤防模型の下層40cmは、堤体と同じ材料で堤防裏のり尻から堤内地(堤防裏のり尻から氾濫流方向で5m)までの長さ10.8mの部分を経盤として設けた。実験は、**図-17**、**表-3**に示す5ケースを対象に、堤体及び基盤の締固め度や空洞の影響に注目し、越流水深5cmとなる流量を一定として破堤に至るまで継続して通水した。堤体と基盤の両方の締固め度の影響の違いを把握するために、実験1-1は高締固、実験1-2は低締固、それぞれの条件とした。実験1-3は、堤防本体のみ低締固(基盤は高締固)とし、実験1-1と比較することによって堤防及び基盤それぞれの締固の影響が把握可能となる。実験1-4は、対象とする堤防の条件が不適切な場合の対応策として、低締固の堤体表面(堤防天端～裏のり面)のみを高締固にしたことによる効果の把握を試みたもので、堤防天端は厚さ0.3m、裏のり面は勾配1:2から1:3になるように覆土した部分のみを高締固とした。実験1-5は、空洞存在の影響把握のために、堤体の表のり尻～裏のり尻にかけて幅2m(水路全幅)、高さ0.1mの部分に碎石(単粒度4号)を用いて空洞を想定した条件に設定した。

本実験は小縮尺模型を用いた実験であり、実物大堤防模型実験より定量的判断の精度は落ちるため、侵食量等について実物大堤防実験と単純な比較はできないが、堤防条件による越水時の耐侵食機能の影響についての定性的判断は可能であると考えられる。

2.6.2 検討結果

図-18は、堤防条件別の侵食速度を、堤防天端、裏のり、堤内地(氾濫原)毎に比較したもので、基盤の条件が同一(高締固)の4ケース(実験1-1、1-3、1-4、1-5)のデータを用いた分析結果である。同図より、締固め度が高い場合の侵食速度は、締固め度の低い場合に

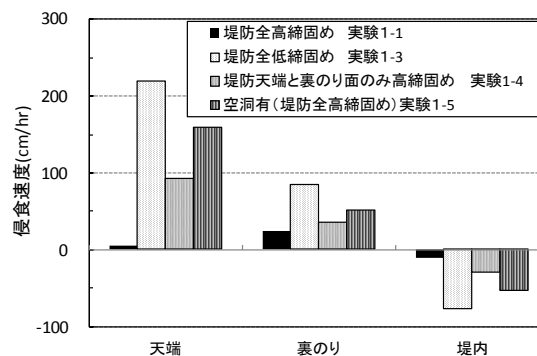


図-18 堤防条件別の侵食速度の比較(実験1)

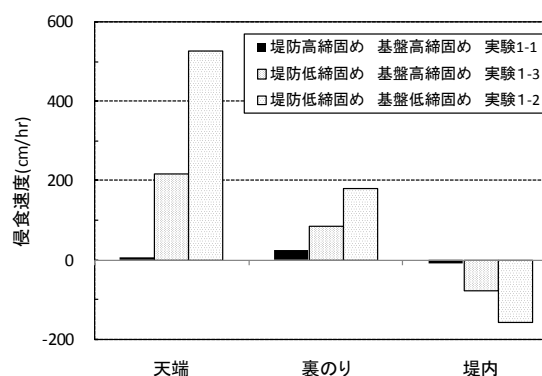


図-19 基盤の締固条件の影響(実験1)

比べて数倍程度以上小さく、堤防条件が良くなくても(締固め度が低い場合)、その堤防の天端～裏のり部の表面だけの締固め度を高くすることで、耐侵食機能が大きく向上されることがわかる。また、堤防締固め度の高い実験1-4の耐侵食機能は、締固め度の低い実験1-3とあまり変わらない結果である。これは、堤防条件が良好でも(締固め度が高い場合)、空洞の存在等によって堤体内の飽和度が高まったことが主な原因と考えられ、堤防の平常時の点検やドレーン工の重要性を示唆するものといえる。**図-19**は、基盤の締固条件による耐侵食機能の把握のために、堤防模型と基盤の各々の締固条件を組合せた実験1-1、1-2、1-3の3ケースについて**図-18**と同様に整理したものである。同図より、実験1-1(堤防高締固+基盤高締固)、実験1-3(堤防低締固+基盤高締固)、No.87(堤防低締固+基盤低締固)の順で、天端～裏のり面での侵食速度がほぼ一定割合で高まることを見て取れる。このことは、堤防本体だけでなく基盤と一体とした堤防管理の重要性を示しているものと考えられる。

3. まとめ

本研究による主な検討結果は次の通りである。

1. 堤防の越水時の耐侵食機能に関する対策や研究の考え方についての経緯を調査した。堤防は、“土堤原則”で線点的構造物であることを考えると、越水時の耐侵食機能に関して従来の構造物の設計論と同一レベルの信頼度まで導くことは困難であり、流域全体の治水安全度をいかに高めるかが重要な点である。
2. 破堤は、単一要因でなく複合要因が考えられるが、過去の破堤事例は“越水”を伴っている場合が多いと判断される。
3. 限られた予算の中で、効率的な堤防の管理や災害時の迅速な復旧等を考慮すると、“土堤”を基本とした対策メニューを考えておくことが基本である。
4. 吸出し防止シートを堤防裏のり天端～のり尻付近に設置する「シート工法」の耐侵食機能は、堤体材料や締固などによって大きく左右されるが、対策無しの場合に比較して1オーダー程度向上することが確認された。
5. 堤体内部の空洞が存在する場合の揚圧力の影響について実験した。シートの膨れは越流直前で最も大きくなるが、越流後は越流水圧によってシートの膨れは小さくなり、シートが捲かれてのり面が侵食されることはなかった。
6. シートの揚圧力に対する安定性について理論的裏付けをした。遮水シート下に空気溜まりが発生しないように排気装置等を設けることは、十分な施工・管理を前提とすれば非常に有効であるが、万一排気管が詰まった等の不測の事態を想定すると、排気層の空隙が空気溜まりの発生を助長させるという面もある。
7. シートの種類及び設置方法による堤防の耐侵食機能について実験的に比較検討した。遮水シートで繋ぎ部を溶着しない場合には、繋ぎ部への越流水の集中に伴って裏のり面の侵食が急激に進行する可能性が高くなる。
8. 吸出防止シートの場合、重ね幅(15cmと30cm)による影響の差異はあまり見られず、また溶着による耐侵食性の向上も見られたが、溶着部分の強度の長期的保持や施工性なども含めた検討が今後必要である。
9. 現地の新堤防(土堤)のり面に降雨時に表層崩壊が発生した事例が多いことから、「シート工法」の表層崩壊に対する影響について検討した。その結果、「シート工法」の表層崩壊のリスクは、降雨強度にはあまり関わらず、対策無しに比較して低下しないことを実験で確認した。
10. 河川堤防の耐侵食機能の評価には河川堤防の構造(形状・質)の把握が必要不可欠であるが、費用や工期、

技術的限界等を考慮すると、長い区間に渡り高精度に河川堤防を調査しそれに応じた対応策を講ずることは非現実的である。このことから、現況堤防を大きく改変しないような効率的な対策について検討した。本実験では堤防の裏のり表面部だけ締固め度を高くすることにより、越流水による侵食速度は、締固め度の低い場合に比べて小さく、耐侵食機能が大きく向上されることがわかった。

11. これまでの研究成果を整理し、堤防越流時の耐侵食機能を向上させる河川堤防の構造の設計・施工に関する試験施工のための手法について、別途技術資料として取り纏めた。越流による堤防の不安定化や変形のメカニズム等が完全には解明されていないため、河川堤防の耐侵食の構造設計・施工が実務的・定量的に行える段階には至っていないが、この技術資料で示した対策は、このような段階での技術的知見をもとにした試行的なものである。

4 おわりに

本研究は、実物大堤防模型に一定の越流量で二次元的に流し、種々の堤防条件の下で比較検討したものである。破堤進行速度を遅らせる対策工検討の観点からはこのような二次元的な実験である程度十分な結果が得られたと考えている。しかし実現象は、破堤進行に伴う堤防天端の低下や流量の増加、さらに破堤開口部の進行が生じること等が考えられる。また越流量やその継続時間が大きく異なる場合も想定される。このような条件下における対策の効果についてはまだ不十分であり、今後、試験施工による分析や三次元実験等による検討の必要性があると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、橋本宏・藤田光一・加藤善明：越水堤防調査最終報告書—解説編—，土木研究所資料，第2074号，1984。
- 2) 例えば、福岡捷二・藤田光一・加賀谷均：アーマ・レビー法尻工の水理設計，水理講演会論文集，土木学会，第31回，1987。
- 3) 藤田光一、末次忠司、諏訪義雄、東高德、白土正美、郡司篤、最上谷吉則：透水性(排気性)材料を用いた堤防裏のり越水強化工法の水理的評価と技術的位置づけについて、河川技術論文集、第7巻、2001.6。

TO IMPROVE LEVEE STRENGTHENING MEASURES AGAINST EROSION BY RIVER WATER.

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : River and Dam Hydraulic
Engineering Research Team

Author : Noriaki HAKOISHI
Akira SAKANO

Abstract : In recent years, there are concern that the increasing in the levee break damage by the excess flood. It was confirmed that the most causes of levee break was erosion by last year's analysis.

Moreover, extraction and its degree of influence of the dominant factors were examined using the hydraulic model test.

In addition, Seat measures worker's effect in various conditions was examined.

Furthermore, we checked theoretically about the stability of the sheet to uplift pressure and influence to surface failure of the bank face of slope by rain.

On the last target , we arranged current study results and arranged it as technological material.

Key words :levee, levee breach, erosion, strengthening measures, hydraulic study, uplift pressure, surface failure,