

Ver1.0

粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての
参考資料

【表面被覆型】

令和4年12月

国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
国立研究開発法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ（土質・振動）

改訂履歴

作成日/更新日	バージョン	更新箇所	更新内容
令和4年12月	1.0	—	—

目次

1. はじめに	1
1.1. 本参考資料の位置づけ	1
1.2. 本参考資料で対象とする構造	1
2. 吸出し防止材+覆土	2
2.1. 越水に対する性能について	3
2.2. 天端保護工・法肩保護工	9
2.3. 裏法保護工	11
2.4. 法尻保護工	20
3. ブロックマット+覆土	21
3.1. 越水に対する性能について	22
3.2. 天端保護工・法肩保護工	25
3.3. 裏法保護工	26
3.4. 法尻保護工	30
4. 参考文献	31

1. はじめに

1.1. 本参考資料の位置づけ

本参考資料で示す構造は、評価の目安となる外力（越流水深及び越流時間）に対して、決壊までの時間を少しでも長くする粘り強い性能（以下「越水に対する性能」という。）を有することを実物大の越水実験等で確認できていない、または実物大の越水実験を実施したが越水に対する性能に課題を有する結果となった構造であり、現時点で越水に対する性能を有しているとは言えない構造である。

本参考資料は、今後の粘り強い河川堤防の技術開発に当たっての参考となるよう、これらの構造について、現状の技術水準を踏まえた構造検討の考え方の一案として示したものである。

また、「粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）」（以下「技術資料」という。）には、粘り強い河川堤防に関して、越水による堤防の損傷のメカニズムや粘り強い河川堤防に求める機能、表面被覆型における基本的な考え方などを記載した。本参考資料とあわせて技術資料も参考とされたい。

1.2. 本参考資料で対象とする構造

本参考資料では表面被覆型のうち、既往の検討を参考に、比較的知見が整理されていることに加え、実物大の越水実験を実施している裏法面を「吸出し防止材＋覆土」で被覆する構造及び「ブロックマット＋覆土」で被覆する構造について紹介する。

表法面の構造については、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して必要とされる表法面の構造と同等の構造を計画高水位から堤防天端までに適用することを基本とする。

なお、本参考資料では、洪水時に堤体内水位の上昇に伴って発生する空気溜りによる揚圧力が表面被覆材に作用し、表面被覆材が不安定化することを懸念し、空気が抜ける表面被覆材を用いている。

2. 吸出し防止材+覆土

吸出し防止材を用いた場合の標準的な構造は図 2-1 のとおりである。また、図 2-2 に過去の実験¹⁾によって確認した変状をもとに作成した変状連鎖図を示す。変状連鎖図は、当該構造の壊れ方、越水に対する性能を有する構造を検討するためのポイントを把握する参考となる。

各部の具体的な構造検討法については、天端保護工、法肩保護工を 2.2、裏法保護工を 2.3、法尻保護工を 2.4 にそれぞれ示す。

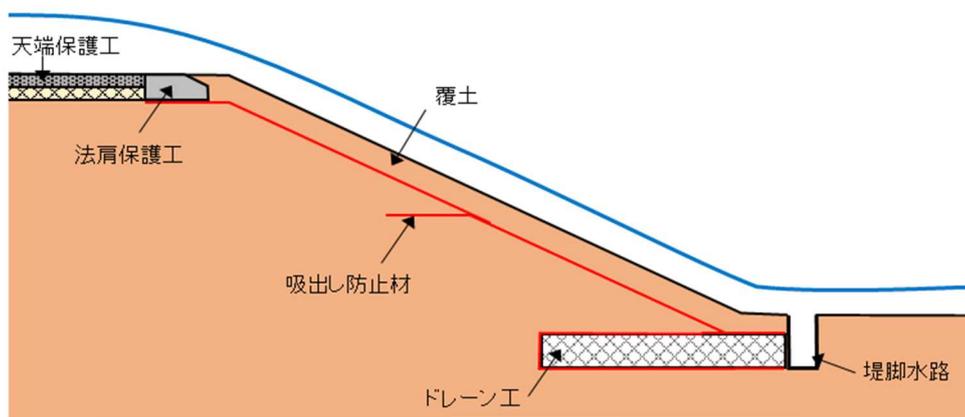


図 2-1 代表的な断面構造図

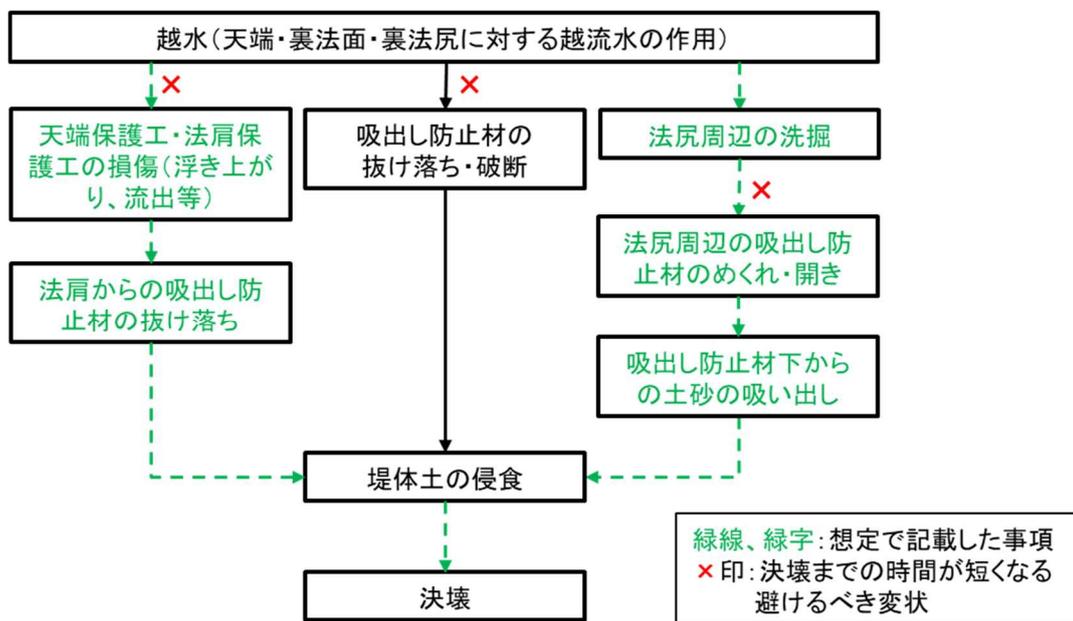


図 2-2 変状連鎖図 (吸出し防止材+覆土)

2.1. 越水に対する性能について

図 2-3 に越水に対する性能を検証した越水実験に用いた堤防模型の断面図を示す。天端幅 4m、堤防高 4m、基礎地盤高 1m、裏法面勾配 1 : 3 の堤防模型に、天端保護工としてアスファルト舗装、法肩保護工として法肩ブロック、裏法保護工として吸出し防止材、法尻保護工としてドレーン工を設置している。各種保護工の構造は、本参考資料に記載の考え方に基づき検討している。ただし、吸出し防止材の堤防縦断方向の重ね幅は 15cm としている。

表法面には、実験の効率化のため固定部を設けており、表法面からの浸透は考慮していない。これは、実際の堤防においても、耐浸透性能が問題となる場合には、表法面に遮水シートを設置したり、裏法尻にドレーン工を設置したりするなどの対策を実施し、浸潤線を上昇させないように設計されることを考慮し、実験上実施したものである。

また、壁際への越流水の集中を避けるため、壁際沿いは高さ 50cm 盛り土を行い、表面をモルタルでコーティングした。

法尻保護工の安定性には、法尻保護工前面の局所的な洗掘深が影響するが、過去の実験において、法尻保護工を設置した場合の局所的な洗掘は 30~40cm 程度である。洗掘を阻害しないように、基礎地盤高は 1m 確保している。

天端保護工の厚さは、碎石層 15cm、アスファルト層 5cm とした。

裏法保護工は、表 2-1 に示す一般的な河川護岸用吸出し防止材の規格値を満足するものとして、厚さ 10mm 程度、透水係数 $4.5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 程度の吸出し防止材を使用した。吸出し防止材は、1 枚あたりの長さを長くするほど、大きなせん断力が作用し、吸出し防止材を引き抜く力が大きくなるため、裏法面の中腹で、区切って設定している。また、吸出し防止材の上に厚さ 50cm の覆土を実施した。

図 2-4 に越水実験に用いた堤体材料の粒度分布を示す。細粒分率 18.4% の砂質土である。堤防模型の制作に当たっては、巻き出し厚 30cm とし、締固め度 90% 以上となるように、締固めた。堤防模型の引張破壊応力は約 9gf/cm^2 であった。

堤防模型製作後、通水を開始し、越流水深 30cm となるまで流量を増加させ、越流水深が 30cm となった段階から合計 3 時間の通水を実施した。

写真 2-1 に 3 時間通水後の堤防模型の状況を示す。覆土の流出過程において、覆土が一部残ることで、不規則な流れが生じ、吸出し防止材の重ね合わせ部のズレやめくれが生じた。また、法肩側の吸出し防止材は流出しなかったが、法尻付近の吸出し防止材が流出した。その結果、堤体土が露出し、越流水が直接作用することによって、堤体土の侵食が見られたことから、越水に対する性能を有するとの評価には至らなかった。そのため、吸出し防止材のズレやめくれが生じないような、重ね合わせ部の固定方法や吸出し防止材の流出が生じないような吸出し防止材の設置方法等について改善する必要がある。ズレやめくれが生じないような改善の方向性については、2.3 (4) ①に、流出が生じないような改善の方向性については 2.3 (4) ②に示した。

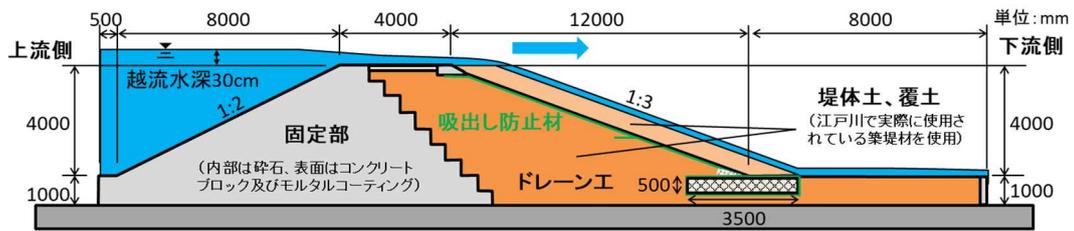


図 2-3 越水実験に用いた堤防模型の断面図

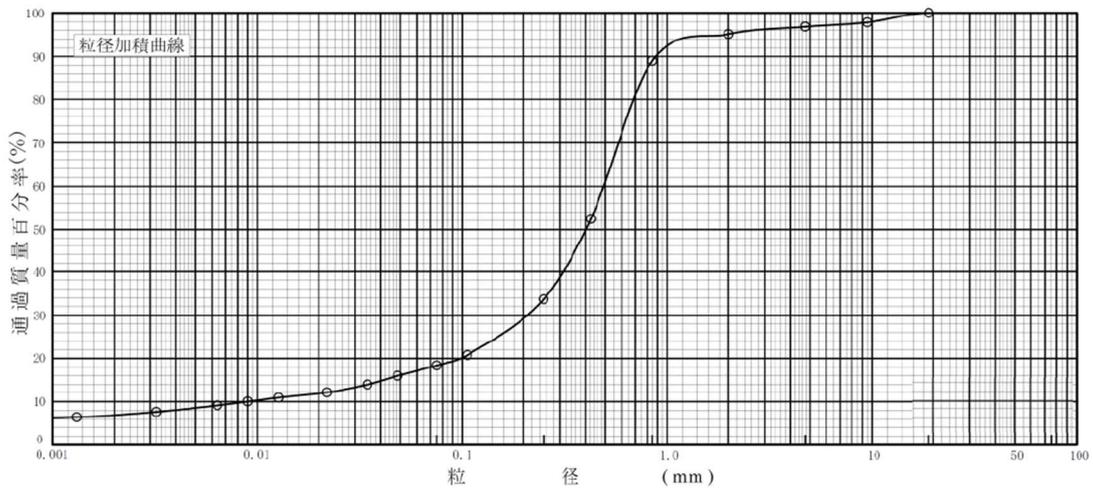


図 2-4 越水実験に用いた堤体土の粒度分布

表 2-1 吸出し防止材の規格値

項目	基準	備考
厚さ	10mm 以上	
開孔径 (シートを通過した土砂の粒径加積曲線の重量 95%に相当する粒径)	0.2mm 以下	
密度	0.10g/cm ² 以上	JIS L 3204 準拠
圧縮率	15%以下	JIS L 3204 準拠
透水係数	10 ⁻² cm/s 以上	JIS L 3204 準拠



写真 2-1 3 時間通水後の堤防模型の状況

＜参考＞吸出し防止材による侵食軽減効果に関して

過去の実験²⁾より、吸出し防止材を用いた裏法保護工の侵食軽減効果は、吸出し防止材と堤体土との隙間と堤体土の耐侵食力によって決まることが分かっている。吸出し防止材による侵食軽減効果は、吸出し防止材を設置することによって、堤体土表面に作用する流速を低減させ、堤体土の侵食速度を軽減することによって発揮される。

まず、吸出し防止材と堤体土の隙間と、吸出し防止材の下層（堤体土表面）の流速との関係を述べる。過去の実験²⁾において高さ 3m、幅 0.5m の堤防模型を使い、越流水深 10cm、20cm、30cm の 3 ケースにおいて、越水時に生じる吸出し防止材の上層と下層の流速が計測されている。図 2-5 のように吸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 2-6）

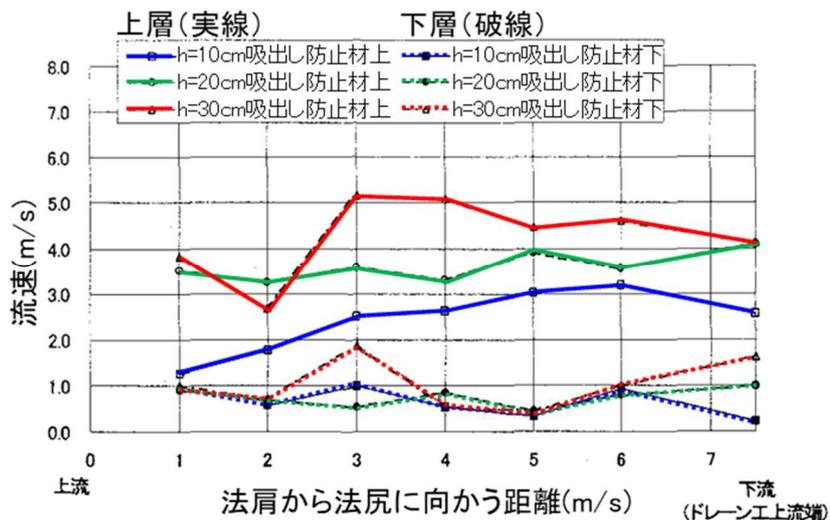


図 2-5 吸出し防止材上下の流速測定結果

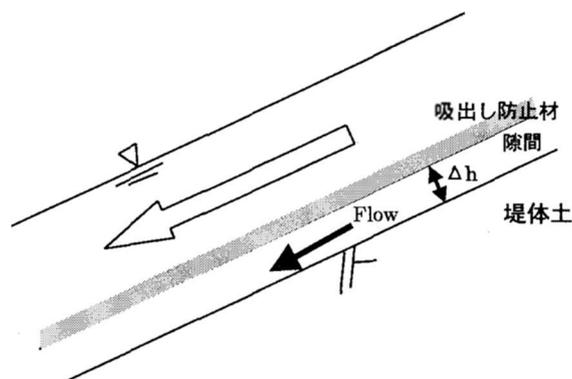


図 2-6 平板間流れモデルのイメージ

図 2-7 は、同じ水路で法尻付近（法肩からの水平距離 6.5m、7m 地点）において、越流水深 30cm 時における吸出し防止材上下の流速の経時変化を測定するとともに侵食の進行過程を観察した結果である。通水後しばらくして流速が 1.5m/s を超えると、裏法面の堤体土の表層侵食がみられるようになり、流速が 2.0m/s を超えると土塊の流出に至った。これは、侵食の進行によって吸出し防止材と堤体表面との隙間が拡大し、下層（隙間）を流れる流速が増加したためと考えられる。この結果から、この実験では、裏法面の堤体土の表層侵食が進む流速は 1.5m/s 程度、侵食限界流速は 2.0m/s 程度と評価できる。

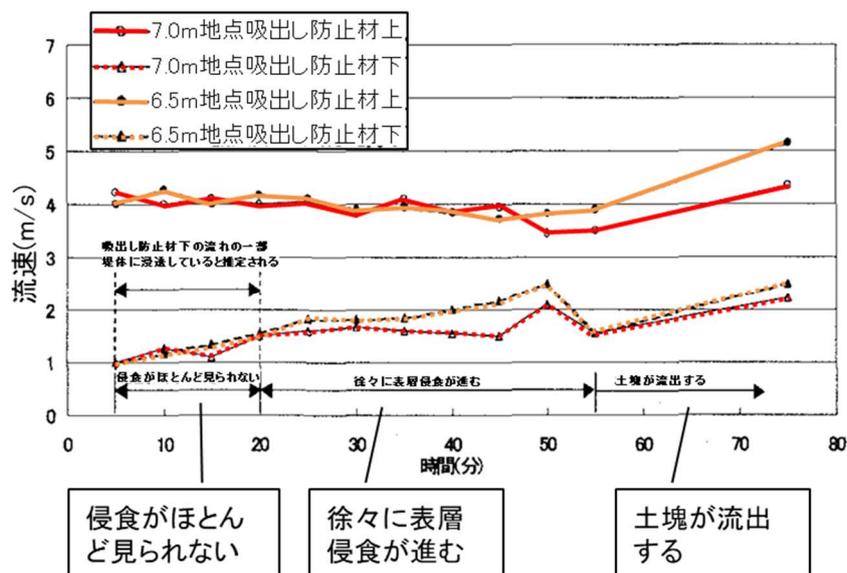


図 2-7 法尻付近での流速の経時変化（越流水深 30cm 時）

吸出し防止材下の流れを図 2-6 の平板間流れモデルとして図 2-5 の流速を再現すると、隙間高は 0.8cm～1.3cm と推定され、通水初期においては、吸出し防止材が堤体表面からほとんど浮いていない状況であったと考えられる。

一方、堤体土表面と吸出し防止材との隙間高が 2.7～5.0cm 程度になると、吸出し防止材下層の流速が 2m/s 近くに増加する。(図 2-8)

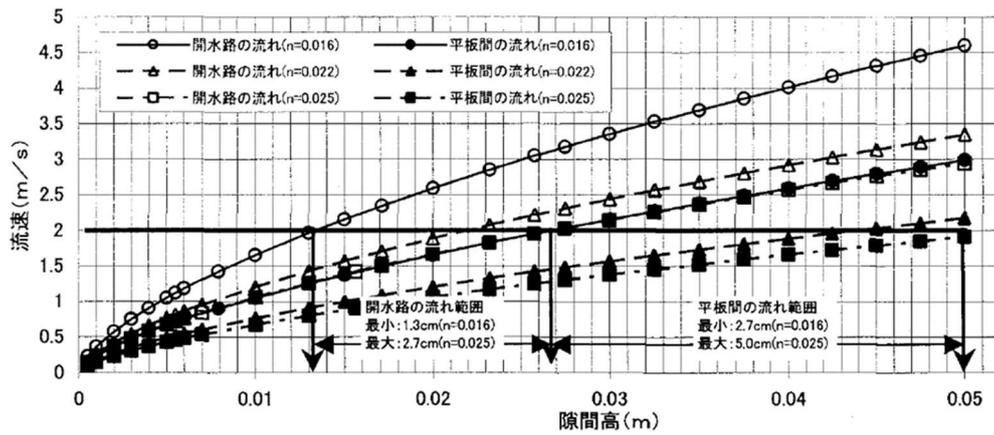


図 2-8 吸出し防止材と堤体表面の隙間高と隙間内の流速との関係

次に、吸出し防止材下層の流速と堤体土の耐侵食力との関係から、吸出し防止材による侵食軽減効果について述べる。堤体土の耐侵食力に関して、堤体土表面の侵食速度は、堤体土の引張破壊応力の低下に伴って増加すること、作用流速の増加に伴って増加することが確認されている³⁾。(図 2-9)

一般的な吸出し防止材（厚さ 1cm、透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ）を用いた場合、吸出し防止材下の流速は最大で 1.0m/s 程度（摩擦速度は 8.3cm/s 程度）であり、一般的な堤防の引張破壊応力が $5 \sim 20 \text{gf/cm}^2$ ($0.5 \sim 2 \text{kN/m}^2$) 程度であることを考えると、堤体土表面の侵食速度は 1 秒間で $6.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ (3 時間で 0.6cm 程度) である。引張破壊応力が 5gf/cm^2 (0.5kN/m^2) の時の侵食限界流速が 2m/s 程度（技術資料図 2.2 13 参照）であること、吸出し防止材下の流速が 2m/s 程度となる隙間高が 2.7~5.0cm であることから、一般的な吸出し防止材を使用した場合は、堤体表面の侵食速度が急激に増加する隙間高になるには、時間的余裕があることが分かる。

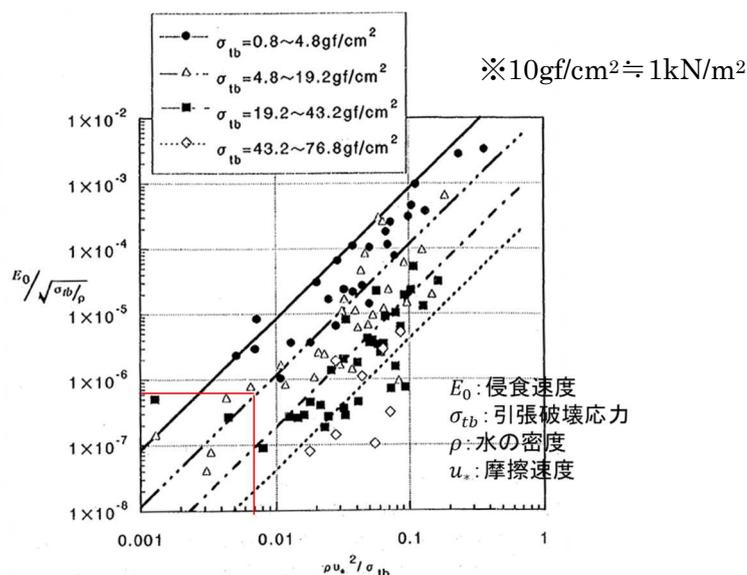


図 2-9 堤体土表面の侵食速度と作用摩擦速度との関係

2.2. 天端保護工・法肩保護工

(1) 構造検討一般

越流水による法肩部の崩壊の進行を遅らせるため、天端は、機械施工が可能な範囲をできるだけアスファルトで被覆する。被覆構成は、当該河川で実施されている堤防天端の管理用通路の標準的な構造に準じる必要がある。

越流水が滑らかに裏法面へ流れ、法肩部の裏法保護工が越流水によってめくれにくくするため、法肩保護工を設ける。

天端保護工・法肩保護工について、以下の項目について検討を行うものとする。

- i せん断力に対する天端保護工の安定性
- ii 水圧に対する天端保護工の安定性
- iii 吸出し防止材の流出を防止するための工夫

(2) 作用・荷重

天端保護工・法肩保護工の構造検討に当たって、考慮する作用・荷重については、技術資料 5.4.2 に示したものと同様とする。

(3) 安定性

天端保護工・法肩保護工の安定性検討については、技術資料 5.4.2 に示したものと同様の検討を行うものとする。

(4) その他留意事項

① 吸出し防止材の流出を防止する構造

裏法保護工の吸出し防止材を固定する構造とするためには、越流水によるせん断力によって吸出し防止材が抜け落ちないように、図 2-10、図 2-11 に示すように吸出し防止材の端部を法肩保護工および天端保護工下に差し込むよう工夫する。

吸出し防止材の差し込み長の検討については 2.3 に示す。

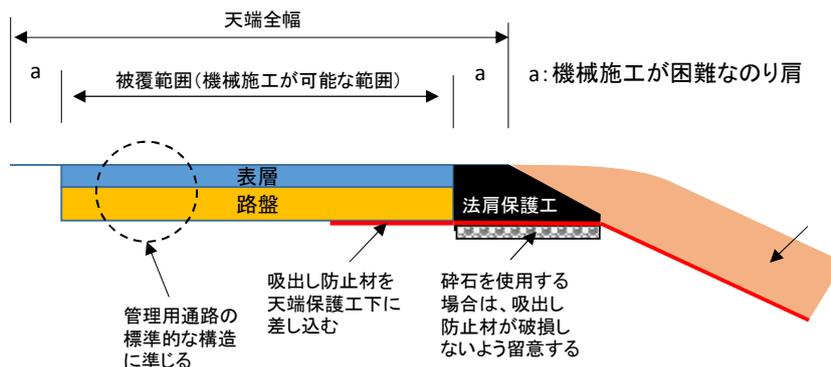


図 2-10 「天端の保護」基本構造イメージ (法肩保護工にブロックを用いた場合)

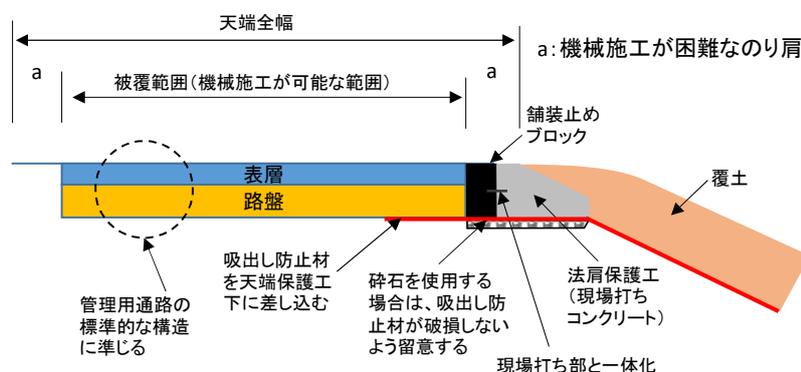


図 2-11 「天端の保護」基本構造イメージ (通常の端部止めブロックを用いた場合)

2.3. 裏法保護工

(1) 構造検討一般

裏法面の勾配を目安として 3 割より緩くできる場合には、法面に作用する流体力が小さくなり、堤体土の吸出しが抑制され、侵食速度は小さくなると考えられる。そのため、裏法保護工としてコンクリートブロックの設置を省略し、吸出し防止材のみの構造としている。ただし、吸出し防止材の紫外線劣化を防ぐため覆土することを基本とする。

裏法面を吸出し防止材で覆う際、一枚の吸出し防止材に作用するせん断力を小さくし、越流水によって吸出し防止材が抜け落ちないように、図 2-12 に示すように、蓑状に複数枚の吸出し防止材で施工することが望ましい。

裏法保護工について、以下の項目の検討を行うものとする。

- i せん断力による吸出し防止材の破断に対する安全性
- ii せん断力による吸出し防止材の抜け落ちに対する安定性
- iii 吸出し防止材の重ね合わせ幅
- iv 吸出し防止材の法尻部の処理方法
- v 覆土の安定性

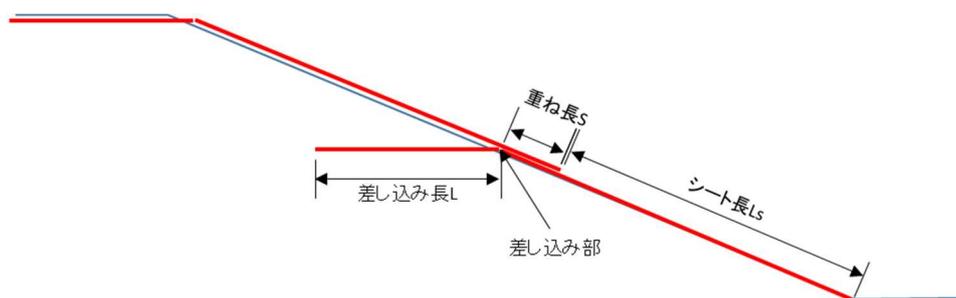


図 2-12 吸出し防止材を蓑状に設置するイメージ

(2) 作用・荷重

裏法保護工の構造検討に当たっては、越水時の状況を対象として、表 2-2 の作用・荷重を考慮することを基本とする。

表 2-2 越水時に考慮する作用・荷重

①	越流水によるせん断力
②	吸出し防止材を押さえる荷重（堤体土、天端保護工、法肩保護工の自重）

① 越流水によるせん断力

越流水により吸出し防止材に作用するせん断力 τ_0 は裏法面の等流水深 h_0 を用いて次式で表される。

$$\tau_0 = \gamma_w h_0 \sin\theta$$

ここに、 γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)

h_0 : 裏法面の等流水深 (m)

θ : 法面の傾き

② 吸出し防止材を押さえる荷重

吸出し防止材を押さえる荷重は、吸出し防止材の敷設方法により堤体土、天端保護工、法肩保護工の自重を考慮する。それぞれの自重の考え方は (3) 安定性を参照されたい。

(3) 安定性

① せん断力による吸出し防止材の破断に対する安全性

吸出し防止材は、被覆ブロックが流出した後、図 2-12 に示す差し込み部（吸出し防止材が法面に露出している部分と天端下又は堤体に差し込まれ隠れている部分との境目）に作用する越流水によるせん断力に対して破断しない必要がある。

法面における吸出し防止材底面の摩擦力は、越水時に吸出し防止材下に水が流れ込み、摩擦力が低下する可能性があることを想定し、考慮しないこととする。

なお、吸出し防止材の重量は作用するせん断力に比べ、微小であるため、以下の検討では考慮しない。

吸出し防止材の差し込み部にかかる張力 T は次式で表される。

$$T = \tau_0 L_s$$

ここに、 L_s : 裏法面の吸出し防止材の長さ (m)

τ_0 : 越流水により吸出し防止材に作用するせん断力 (kN/m²)

※ τ_0 は、裏法面におけるせん断力が最大値となるのは裏法面の流速が最大となる等流水深のときであり、この場合について考えるものとする

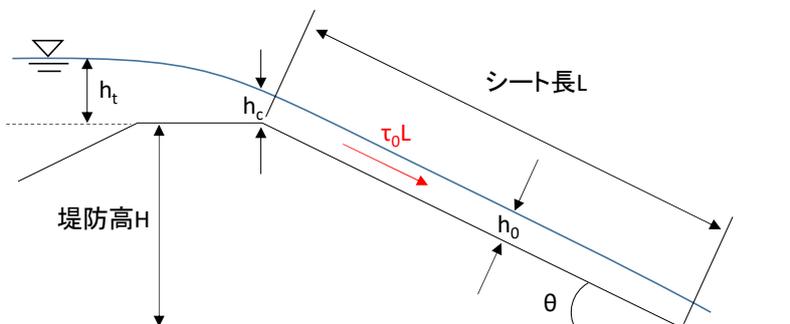


図 2-13 越流水により吸出し防止材に作用するせん断力

吸出し防止材の差し込み部にかかる張力 T に対して次式が成立するように吸出し防止材を選定する。

$$\frac{T_a}{T} \geq F_s$$

ここに、 F_s : 安全率

T_a : 吸出し防止材の引張強度 (kN/m)

安全率 F_s は吸出し防止材の化学的、経年的な作用による強度の低下を考慮し、2.0 とする。

② せん断力による吸出し防止材の抜け落ちに対する安定性

A) 法面中腹に吸出し防止材を差し込む場合

吸出し防止材の抜け落ちに関しては、法面上の吸出し防止材に作用する越流水によるせん断力に対して、堤体へ差し込んだ吸出し防止材の引き抜き耐力が上回る必要がある。

吸出し防止材一枚の法長を L_s (m) とすると、この場合、安全率を F_s として以下の式が成立するように設計する。なお、安全率 F_s は引き抜き耐力のバラツキを考慮し2.0とする。

$$F_0 > \tau_0 L_s \cdot F_s$$

ここで、 F_0 は堤体に差し込んだ吸出し防止材上の堤体土の自重 (図 2-14 の赤点線枠の範囲) により、差し込み部分の吸出し防止材底面に働く単位幅当たりの引き抜き耐力であり、次式で求められる。

なお、越水時には、堤体に差し込んだ吸出し防止材上の堤体土は湿潤状態となり、乾燥状態の時より重くなるが、ここでは、安全側の検討とするため、堤体土の単位体積重量は、乾燥状態の単位体積重量としている。

$$F_0 = \alpha (\gamma_s \cdot \frac{L^2 \cdot \tan \theta}{2})$$

ここに、 L : 吸出し防止材の差し込み長 (m)

γ_s : 堤体土の単位体積重量 (kN/m³)

α : 補正係数 (吸出し防止材上の荷重に対して、吸出し防止材の材質、堤体土の土質、堤体土の締固め土等によって変動する係数)

θ : 裏法面の傾斜角 (°)

過去の実験結果⁴⁾を参考にし、ここでは α は1.5を用いる。

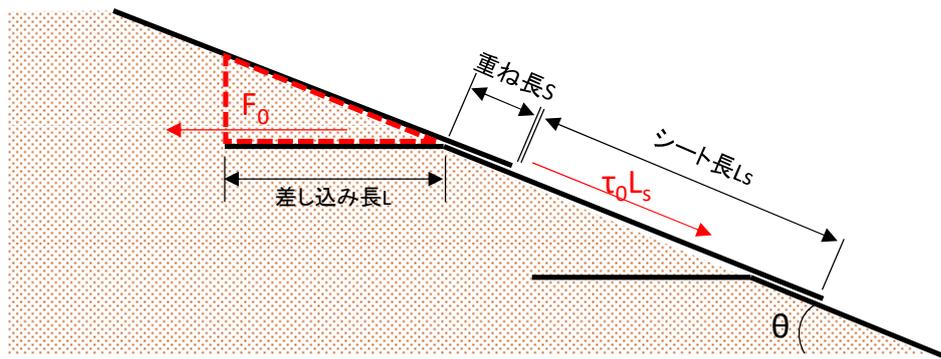


図 2-14 吸出し防止材を葎状に重ねて設置した場合の力の釣り合い

以上より、吸出し防止材が抜け落ちないために必要な差し込み長 L は次のように求められる。

$$L > \sqrt{\frac{2F_s \cdot \gamma_w \cdot L_s \cdot h_0 \cdot \sin\theta}{\alpha \cdot \gamma_s \cdot \tan\theta}}$$

なお、堤体内に差し込むことによって、浸透流の作用に伴う堤体土と吸出し防止材の隙間の拡大等が懸念されるため、計画堤防断面内に差し込む場合には、差し込み長や箇所を不必要に増やさず、また差し込んだ吸出し防止材周辺の締固めに特に留意すること。堤体への差し込みが難しい場合には、法肩および天端保護工下に長く差し込むことによって、抜け落ちないようにする。

B) 吸出し防止材を天端下に差し込む場合

A) と同様に、安全率を F_s として以下の式が成立するように設計する。なお、安全率 F_s は引き抜き耐力のバラツキを考慮し 2.0 とする。

$$F_0 > \tau_0 L_s \cdot F_s$$

ここで、 F_0 は天端下に差し込んだ吸出し防止材上の天端保護工等の水中重量（図 2-15 の赤点線枠の範囲）により、差し込み部分の吸出し防止材底面に働く単位幅当たりの引き抜き耐力であり、図 2-15 の天端構造の場合、次式で求められる。（天端構造、差し込み長さによって異なる）

なお、法肩部には、越水時に負圧が生じることが実験で確認されているが、法肩部の形状に応じた負圧の算出方法が確立されていない。そのため、ここでは、浮力のみを考慮し、法肩保護工、天端舗装工、碎石の単位体積重量は、水中単位体積重量とした。

$$F_0 = \alpha(\gamma_a(L_1 + L_2)H_1/2 + \gamma_b(L - L_1)H_1 + \gamma_c LH_2)$$

ここに、 L : 吸出し防止材の差し込み長 (m)

L_1 : 法肩保護工底面の長さ (m)

L_2 : 法肩保護工上面の長さ (m)

H_1 : 天端舗装工の厚さ (m)

H_2 : 碎石層の厚さ (m)

γ_a : 法肩保護工の水中単位体積重量 (kN/m³)

γ_b : 天端舗装工の水中単位体積重量 (kN/m³)

γ_c : 碎石の水中単位体積重量 (kN/m³)

α : 補正係数（吸出し防止材上の荷重に対して、吸出し防止材の材質、堤体土の土質、堤体土の締固め土等によって変動する係数）

過去の実験結果⁴⁾を参考にし、ここでは α は 1.0 を用いる。

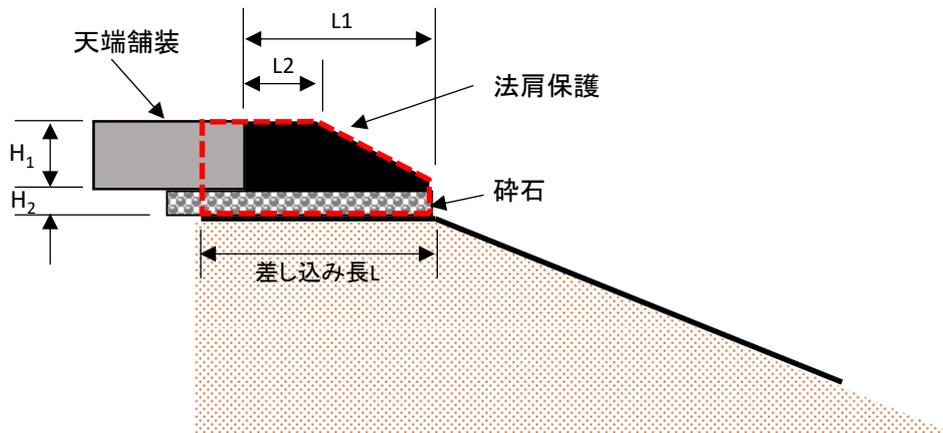


図 2-15 吸出し防止材を天端に差し込む場合における、上載荷重の範囲イメージ

以上より、吸出し防止材が抜け落ちないために必要な差し込み長 L は次のように求められる。(天端構造、差し込み長さによって異なる)

$$L > \frac{\frac{F_s \cdot \gamma_w \cdot L_s \cdot h_0 \cdot \sin\theta}{\alpha} + \gamma_b L_1 H_1 - \gamma_a (L_1 + L_2) H_1 / 2}{\gamma_b H_1 + \gamma_c H_2}$$

＜参考＞補正係数について⁴⁾

補正係数は、以下に示す実験結果から最も低い値（少数第2位切り捨て）を用いることとする。

高さ1.5m、幅1mの実験水路内に、高さ約1.2m、幅1m、2割勾配の堤防模型を製作（締固め度85～90%を目標に締固め）し、堤防模型の天端下や法面中腹にシートを差し込んで固定し、シートの引き抜き耐力を測定した。この時のシートの上載荷重と引き抜き耐力との関係を表2-3、表2-4に示す。

なお、測定の際には、シートと法面は接触させていないため、シートと法面の摩擦については考慮していない。また、測定は、乾燥状態で行った。

表 2-3 法面中腹にシートを差し込んだ場合の引き抜き耐力

シートの種類	締固め度 (%)	差し込み長 (m)	上載荷重 (kN/m)	引き抜き耐力 (kN/m)	補正係数 (引き抜き耐力/上載荷重)
吸出し防止材	85	0.6	1.5	3.14	2.09
吸出し防止材	85	0.9	3.38	6.08	1.8
遮水シート	85	0.9	3.38	5.3	1.57
遮水シート	90	0.3	0.4	0.98	2.55
遮水シート	90	0.6	1.59	3.73	2.35
遮水シート	90	0.9	3.57	8.24	2.31

表 2-4 天端下にシートを差し込んだ場合の引き抜き耐力

シートの種類	締固め度 (%)	差し込み長 (m)	上載荷重 (kN/m)	引き抜き耐力 (kN/m)	補正係数 (引き抜き耐力/上載荷重)
吸出し防止材	85	0.45	1.53	1.67	1.09
吸出し防止材	85	0.82	3.18	3.92	1.23
遮水シート	85	1.12	6.46	7.26	1.12

※シートの引き抜きの過程で、シートに破断等の損傷が見られたケースを除いている。



写真 2-2 実験模型

(4) その他留意事項

① 吸出し防止材の重ね合わせ幅

過去に、吸出し防止材の堤防縦断方向への重ね合わせ幅を変えて、越水実験が実施²⁾されている。その実験によると、重ね合わせ幅を 15cm とした場合より、30cm とした方が、堤体の侵食が生じにくい。そのため、吸出し防止材の堤防縦断方向への重ね合わせ幅は、30cm 以上とするとよい。

また、過去の実験⁵⁾より吸出し防止材を蓑状に設置する場合の重ね長 S (図 2-12) は、30cm 以上とすると吸出しを一定程度防げることが分かっている。また、堤防縦断方向の重ね部は、アンカーピン等で重ね部のズレを防止する工夫が考えられる。

② 吸出し防止材の法尻部の処理方法

過去の実験⁶⁾より、堤内地の水がドレーン工およびその下を通して裏法に浸透することにより、裏法面に遮水シートを設置した場合にはアップリフトが働くことが分かっている。このアップリフトが働くことにより裏法下流部では遮水シートが水袋状態に膨らみ、またこの膨らみ部分に越流水による強い流体力を受けると遮水シートは破損することが確認されている。そのため、裏法下流部において遮水シートとドレーン工の接続を維持するのは困難とされている。裏法面に吸出し防止材を設置した場合においても同様の現象が生じると考えられるため、裏法面を保護するための吸出し防止材は、法尻で縁を切り、ドレーンを囲う吸出し防止材との接着や法留工とドレーン工の間に挟みこむ等の処理は行わないこととする。

③ 覆土の安定性

覆土は、吸出し防止材上に載せるため、降雨、地震などに対して安定性を確保する必要がある。ただし、堤体土、覆土として適切な盛土材料を選定し、必要に応じて法尻ドレーン等の排水対策を行ったうえで、タンパ等で入念に締固めを行うことを前提とし、安定検討は実施しない。

2.4. 法尻保護工

(1) 構造検討一般

法尻保護工はドレーン工と兼用するものとする。

ドレーン工や堤脚水路の構造については、技術資料 5.4.4 で示したものと同様の検討を行う必要がある。

3. ブロックマット+覆土

ブロックマットを用いた場合の標準的な構造は図 3-1 のとおりである。

各部の具体的な構造検討方法については、天端保護工、法肩保護工を 3.2、裏法保護工を 3.3、法尻保護工を 3.4 にそれぞれ示す。

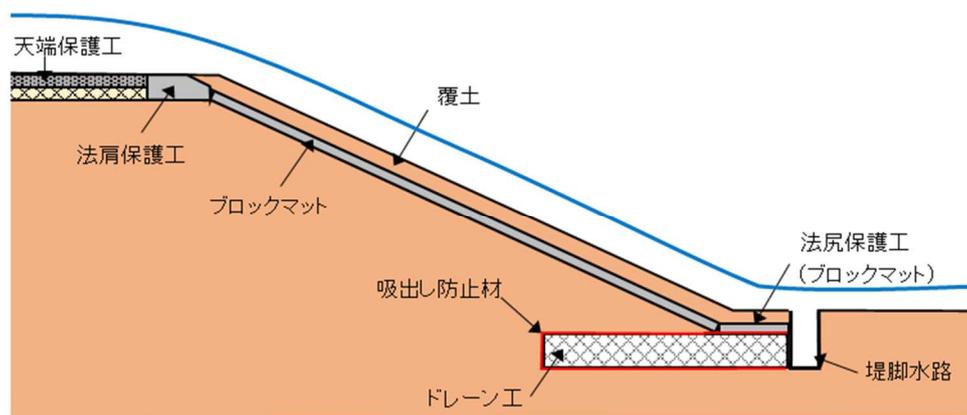


図 3-1 代表的な断面構造図

3.1. 越水に対する性能について

図 3-2 に越水に対する性能を検証した越水実験に用いた堤防模型の断面図を示す。天端幅 4m、堤防高 4m、基礎地盤高 1m、裏法面勾配 1 : 3 の堤防模型に、天端保護工としてアスファルト舗装、法肩保護工として法肩ブロック、裏法保護工としてブロックマット、法尻保護工としてドレーン工を設置している。各種保護工の構造は、本参考資料に記載の考え方にに基づき検討している。

表法面には、実験の効率化のため固定部を設けており、表法面からの浸透は考慮していない。これは、実際の堤防においても、耐浸透性能が問題となる場合には、表法面に遮水シートを設置したり、裏法尻にドレーン工を設置したりするなどの対策を実施し、浸潤線を上昇させないように設計されることを考慮し、実験上実施したものである。

また、壁際からの侵食の進行を避けるため、壁際沿いには、止水シートを設置した。(図 3-4 参照)

法尻保護工の安定性には、法尻保護工前面の局所的な洗掘深が影響するが、過去の実験において、法尻保護工を設置した場合の局所的な洗掘は 30~40cm 程度である。洗掘を阻害しないように、基礎地盤高は 1m 確保している。

今回の実験では、覆土が流出した後の状況を想定し、覆土は省略した。

天端保護工の厚さは、砕石層 15cm、アスファルト層 5cm とした。

裏法保護工には、吸出し防止効果を有するフィルターシート（不織布）と多数の小型コンクリートブロックを一体化したブロックマットを用いた。フィルターシートの厚さは 3mm 程度であった。ブロックマットは、アンカーピンで固定した。

図 3-3 に越水実験に用いた堤体材料の粒度分布を示す。細粒分率 15.4%の砂質土である。堤防模型の制作に当たっては、巻き出し厚 30cm とし、締固め度 90%以上となるように、締固めた。堤防模型の引張破壊応力は約 9gf/cm²であった。

堤防模型製作後、通水を開始し、越流水深 20cm において 5 分間、越流水深 25cm において 5 分間、越流水深 30cm において合計 1 時間程度の通水を実施した。越流水深 30cm において、合計 1 時間程度の通水により、堤防模型が大きく侵食されたため、実験を終了した。ブロックマットは、堤体土の侵食に伴い、沈下していたが、アンカーピンにより固定されていたため、滑動しなかった。

写真 3-1 に越流水深 30cm において、合計 1 時間程度通水した後の堤防模型の状況を示す。

図 3-4 に侵食の進行過程の推定イメージを示す。壁際沿いには、止水シートを設置していたものの、止水シートの設置範囲外から壁際に向かって侵食が進行したものと推測される。2.1 の<参考>吸出し防止材による侵食軽減効果に関してに記載したように、堤体土の侵食を軽減するためには、吸出し防止材によって、堤体土表面に作用する流速を低減することが重要となる。吸出し防止材等のシート材による流速低減効果については、シート材の厚さが関係すると考えられるが、ブロックマットに使用されるフィルターシートの厚さが

3mm 程度と薄かったことが堤体土の侵食が進行した要因の 1 つと推測される。堤体土の侵食を抑制するための改善の方向性について、3.3 に示した。

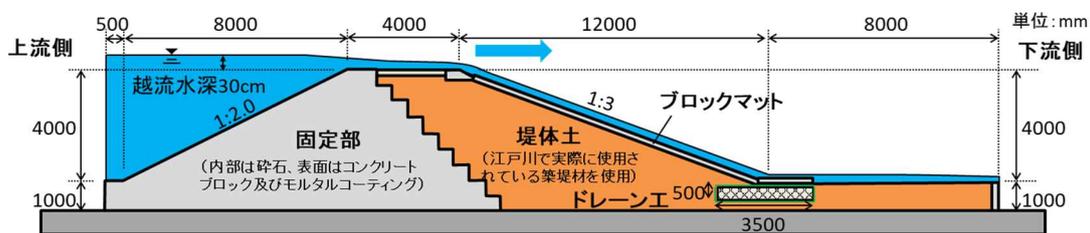


図 3-2 越水実験に用いた堤防模型の断面図

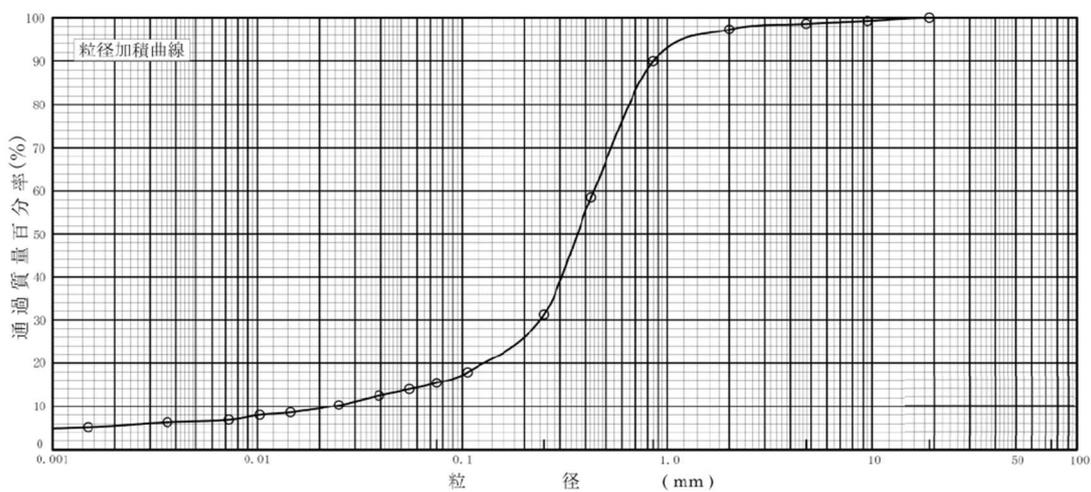


図 3-3 越水実験に用いた堤体土の粒度分布



写真 3-1 1時間通水後の堤防模型の状況

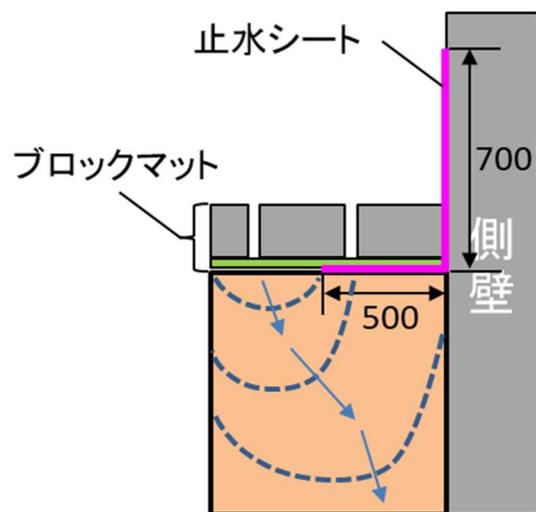


図 3-4 侵食の進行過程の推定イメージ (断面図)

3.2. 天端保護工・法肩保護工

(1) 構造検討一般

天端保護工・法肩保護工は、技術資料 5.4.2 で示した標準構造と同様とする。

(2) 作用・荷重

天端保護工・法肩保護工の構造検討に当たって、考慮する作用・荷重については、技術資料 5.4.2 に示したものと同様とする。

(3) 安定性

天端保護工・法肩保護工の構造検討については、基本的に技術資料 5.4.2 に示したものと同様の検討を行うものとする。なお、ブロックマットの場合はシートの重ね代の部分を天端・法肩保護工の下に差し込むことを基本とする。差し込み長は可能な限り長くとることが望ましい。

(4) その他留意事項

天端保護工・法肩保護工のその他の留意事項については、技術資料 5.4.2 に示したものと同様とする。

3.3. 裏法保護工

裏法保護工としては、堤体土の吸出しを抑制するとともに裏法部の侵食過程を遅らせることを目的として、吸出し防止効果を有するフィルターシートと多数の小型コンクリートブロックを一体化したブロックマットを設置する。ただし、堤体が砂質土の場合、一般的なブロックマットで使用されている厚さ数 mm 程度のフィルターシートでは、河川護岸に使用する通常の吸出し防止材（10mm 厚）と同等の侵食軽減効果（2.1<参考>吸出し防止材による侵食軽減効果に関して 参照）が十分に発揮されないことがある。このことから、ブロックマットに使用しているフィルターシートが、河川護岸に使用する通常の吸出し防止材より薄い場合には、ブロックマットの下に別途、通常の吸出し防止材を敷設する。もしくは、表層 50cm 程度を粘性土で置き換える等の対策を行うことが望ましい。ただし、粘性土で表層を置き換える場合には耐浸透性能への影響に留意する。

また、コンクリートブロックと同様に環境や利用の観点から覆土することを基本とする。

（1） 構造検討一般

裏法保護工は、評価の目安とする越流水深が作用した場合の以下の項目について検討を行うものとする。

- i ブロックマットの滑動に対する安定性

（2） 作用・荷重

裏法保護工の構造検討に当たっては、越水時の状況を対象として、表 3-1 の作用・荷重を設定し、構造を検討することを基本とする。

表 3-1 越水時に考慮する作用・荷重

①	自重
②	越流水による抗力、揚力
③	アンカーピンによる抵抗力 ※必要に応じて

(3) 安定性

ブロックマットは実験で水理特性値を取得している製品が多いため、基本的には技術資料 5.4.3 に示したコンクリートブロックの構造検討と同様に護岸の力学設計法を援用した手法で検討するものとする。ただし、ブロックマットのみで滑動に対して抵抗できない場合にはアンカーピン等を用いて滑動に対する抵抗力を付加することも可能とする。

アンカーピンによる抵抗力を考慮する場合は、堤体の土質等も考慮したうえで検討を行うのがよい。ただし、アンカーピンの抵抗力については明確な評価手法がないため、以下では、港湾構造物を準用した手法を参考までに示した。これらは、港湾構造物に用いる杭を対象とした手法であり、アンカーピンと用途、規模が大きく異なる構造の評価手法であるため、必ずしもアンカーピンに対する適用性が検証されているものではない。このため、検討時点での計算による評価だけではなく、施工段階においてアンカーピンの抵抗力の確認を行うことが望ましい。

なお、アンカーピンの抵抗力については、締固め度が 90%となるように 10cm 毎に密度管理を行った飽和、不飽和状態の模擬地盤（砂質土：N 値 4 程度）でアンカーピンの引き抜き試験が実施されている。試験の結果からは、抵抗力がより小さくなる飽和状態においても以下の〈参考〉に記述する算出方法の計算結果と同等の抵抗力があることが確認されている。

<参考>アンカーピンによる滑動抵抗力の検討手法（『港湾構造物設計基準』7より）

チャンの方法によると、地中に十分長く打ち込まれた杭（長杭）について、杭の頭部が固定されておらず、地表面から杭の頭部が突出している場合（地表面より高い位置で軸直角方向の力が作用する場合）杭の地表面での水平変位 y_0 は、次式で与えられる。

$$y_0 = \frac{1 + \beta \cdot h}{2 \cdot E \cdot I \cdot \beta^3} \cdot T$$

ここに、 $\beta = \{E_S / (4 \cdot E \cdot I)\}^{1/4}$

T : 杭の頭部に作用する軸直角方向の力（長杭の場合）

E_S : 地盤の弾性係数

E : 杭の弾性係数

I : 杭の断面 2 次モーメント

y_0 : 地表面における杭の水平変位

h : 載荷高さ

また、 E_S は、横方向の地盤反力係数を用いて、次式で表される。

$$E_S = K_h \cdot D$$

ここに、 D : 杭の幅または直径

K_h : 横方向の地盤反力係数

港湾構造物設計基準によると、簡単に K_h を求める方法として、横山の方法がある。これによれば、図 3-5 から K_h は次式で表される。

$$K_h = 0.2 \cdot N$$

ここに、 N : 地表面から β^{-1} までの深さの地盤の平均 N 値

アンカーピンによる滑動抵抗力を算出する際には、ブロックマットに設置されているブロックとアンカーピンとの地表面における水平方向の隙間が 3cm 程度あると仮定し、 $y_0=3\text{cm}$ のときの、 T を滑動抵抗力とした。

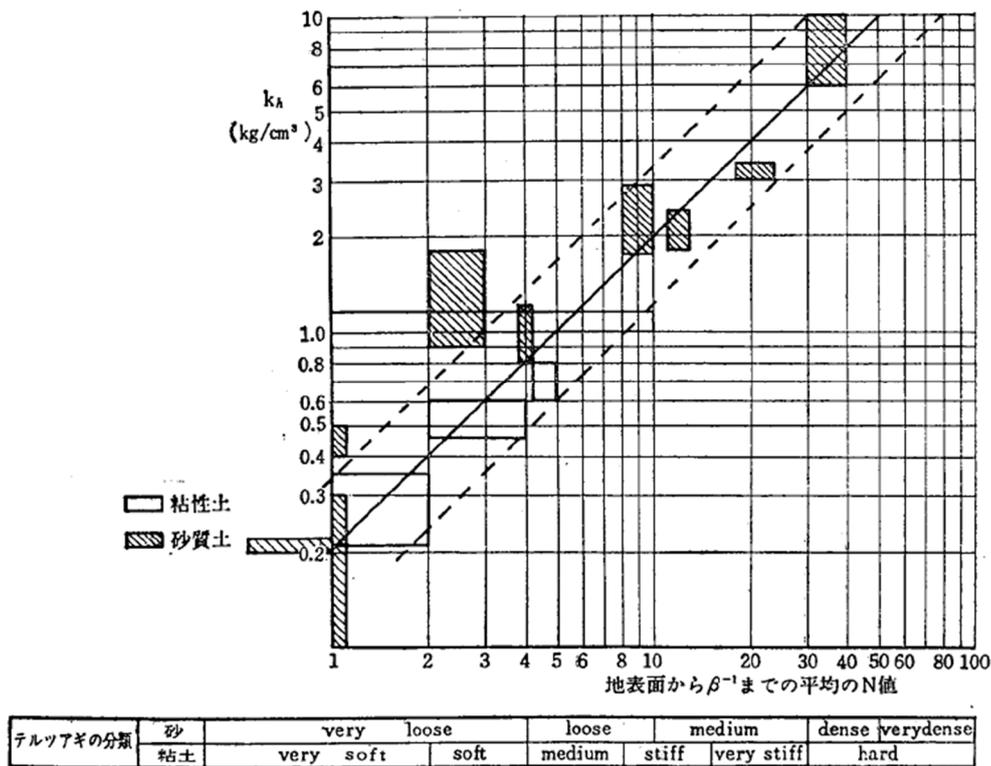


図 3-5 地表面から β^{-1} までの深さの地盤の平均 N 値と K_h との関係

次に、実際に使用するアンカーピンが長杭として作用するかを考慮する。杭の根入れ長さ L が曲げモーメントがゼロとなる深さの内、最も浅い深さ L_{m1} に比較して十分に大きければ長杭として考えることができる。

杭の頭部が固定されておらず、 $h > 0$ の条件での弾性方程式より、 L_{m1} は次式を用いて算定することができる。

$$L_{m1} = \tan^{-1}\{-\beta h / (1 + \beta h)\} / \beta$$

計算の結果、 L_{m1} が根入れ長さよりも大きい場合には、短杭としての補正が必要となる。

港湾構造物設計基準に示されている杭頭変位比と根入れ比の関係 (図 3-6) から、 $E_r < 1$ において、根入れ比 $E_r = L / L_{m1}$ と、短杭と長杭の杭頭の水平変位の比 $(y_{top})_r$ の傾きを読み取ると、 $(y_{top})_r$ はおよそ $E_r^{-2.3}$ に比例すると考えられる。

また、杭頭部の水平変位 y_{top} と杭の地表面での水平変位 y_0 が比例すると考えると、杭の滑動抵抗力は変位に比例することから、ある y_0 に対する短杭の抵抗力 T' は長杭の抵抗力 T に対し、次式の関係と考えることができる。

$$T' = T \cdot E_r^{2.3}$$

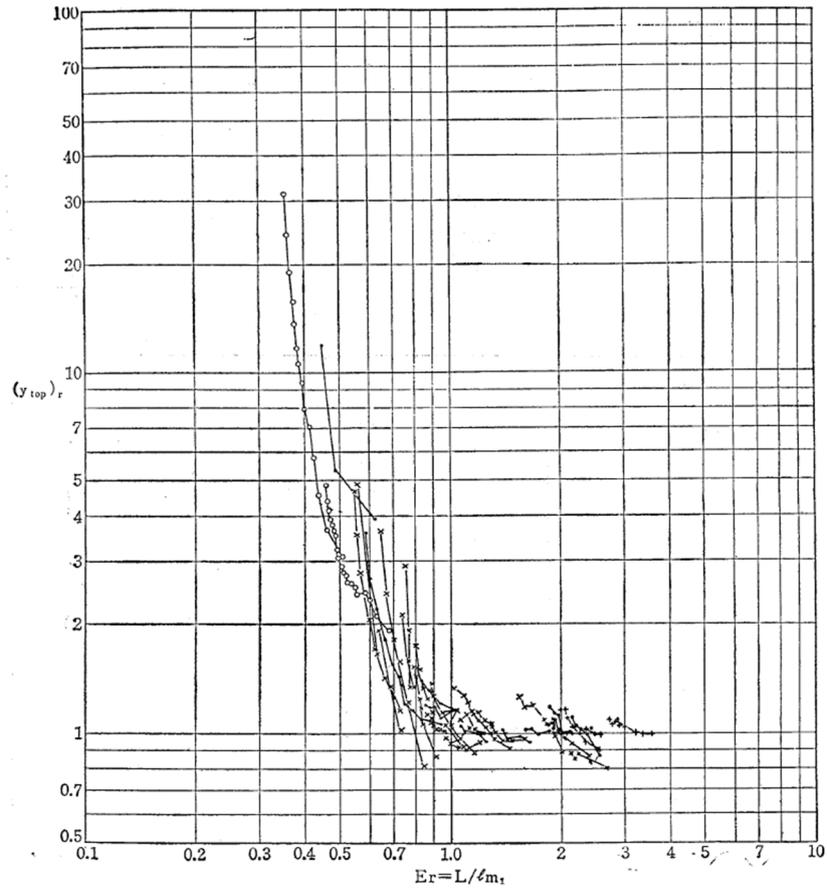


図 3-6 短杭と長杭の杭頭変位比 $(y_{top})_r$ と根入れ比 E_r との関係

3.4. 法尻保護工

法尻保護工は、技術資料 5.4.4 で示した標準構造と同様とする。

(1) 構造検討一般

法尻保護工の構造については、技術資料 5.4.4 で示したものと同様とする。

4. 参考文献

- 1) 須賀堯三・橋本宏・石川忠晴・藤田光一・葛西敏彦・加藤善明：越水堤防調査最終報告書—解説編一，土木研究所資料，第 2074 号，1984
- 2) 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，河川技術論文集，第 7 卷，pp.109-114，2001.
- 3) 宇多高明・望月達也・藤田光一・平林桂・佐々木克也・服部敦・藤井政人・深谷渉・平館治：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—流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために—，土木研究所資料，第 3489 号，1997.
- 4) 三好朋宏・笹岡信吾・森本洋一・福島雅紀：越水に対する堤防強化におけるシートの固定方法に関する検討，河川技術論文集，27 卷，p. 187-192，2021.
- 5) 福岡捷二・藤田光一・加賀谷均：アーマー・レベীর設計，その 1，土木技術資料 30-3，1988
- 6) 橋本宏・福岡捷二・藤田光一・加賀谷均・久楽勝行・吉岡淳・細谷政和：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
- 7) （社）日本港湾協会：港湾構造物設計基準，1970.