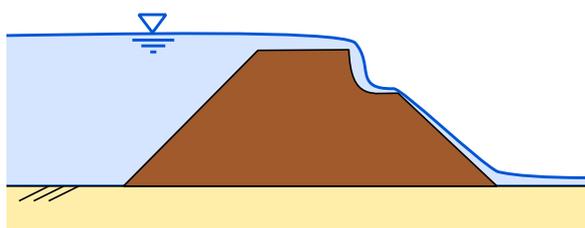


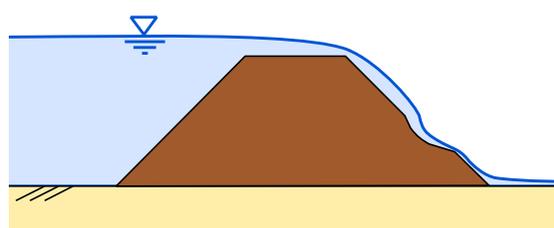
越水時の土堤の壊れ方
(東日本台風で越水した箇所での分析事例含む)

越水による河川堤防の壊れ方

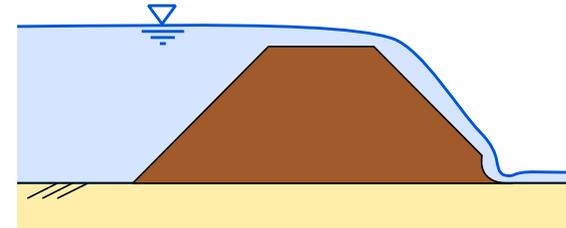
- 土堤の侵食過程は、川裏部から始まり、天端の崩壊へと進行する。
- 裏法の侵食の主要因は、流水による直接の侵食であり、堤体表面の耐侵食力によって、侵食が始まる位置が異なる(①~③)。
- 天端崩壊の主要因は、川裏部が侵食された後の堤体自身の不安定性による。



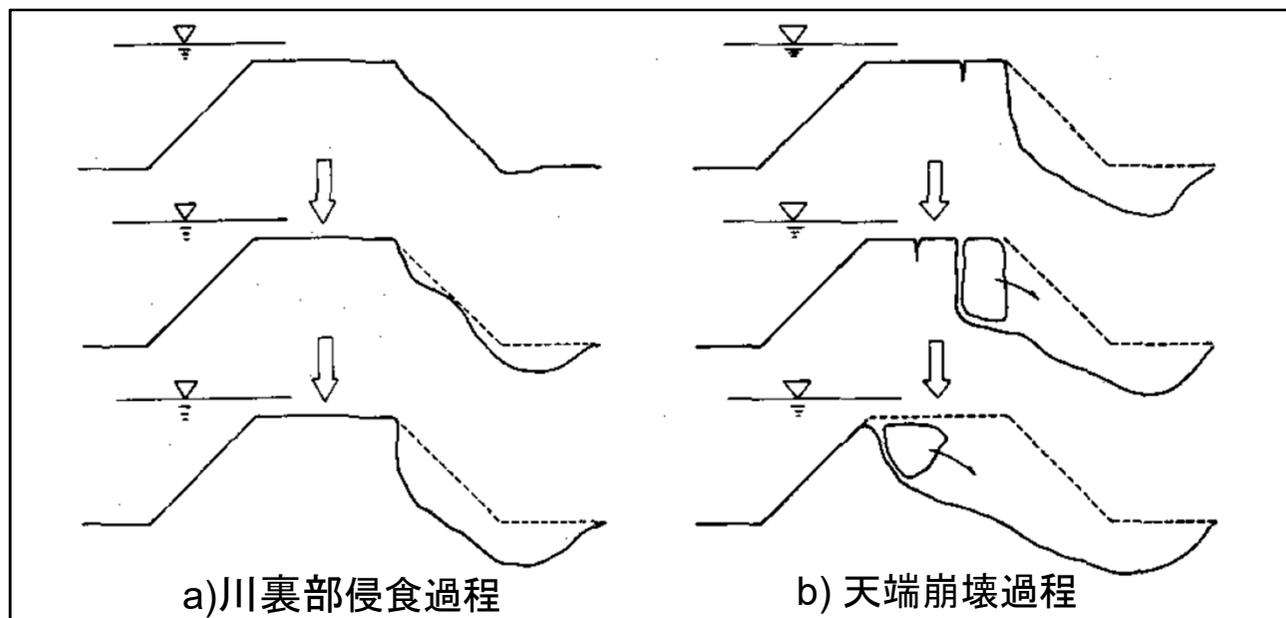
①法肩から進行



②法面から進行



③法尻から進行



a)川裏部侵食過程

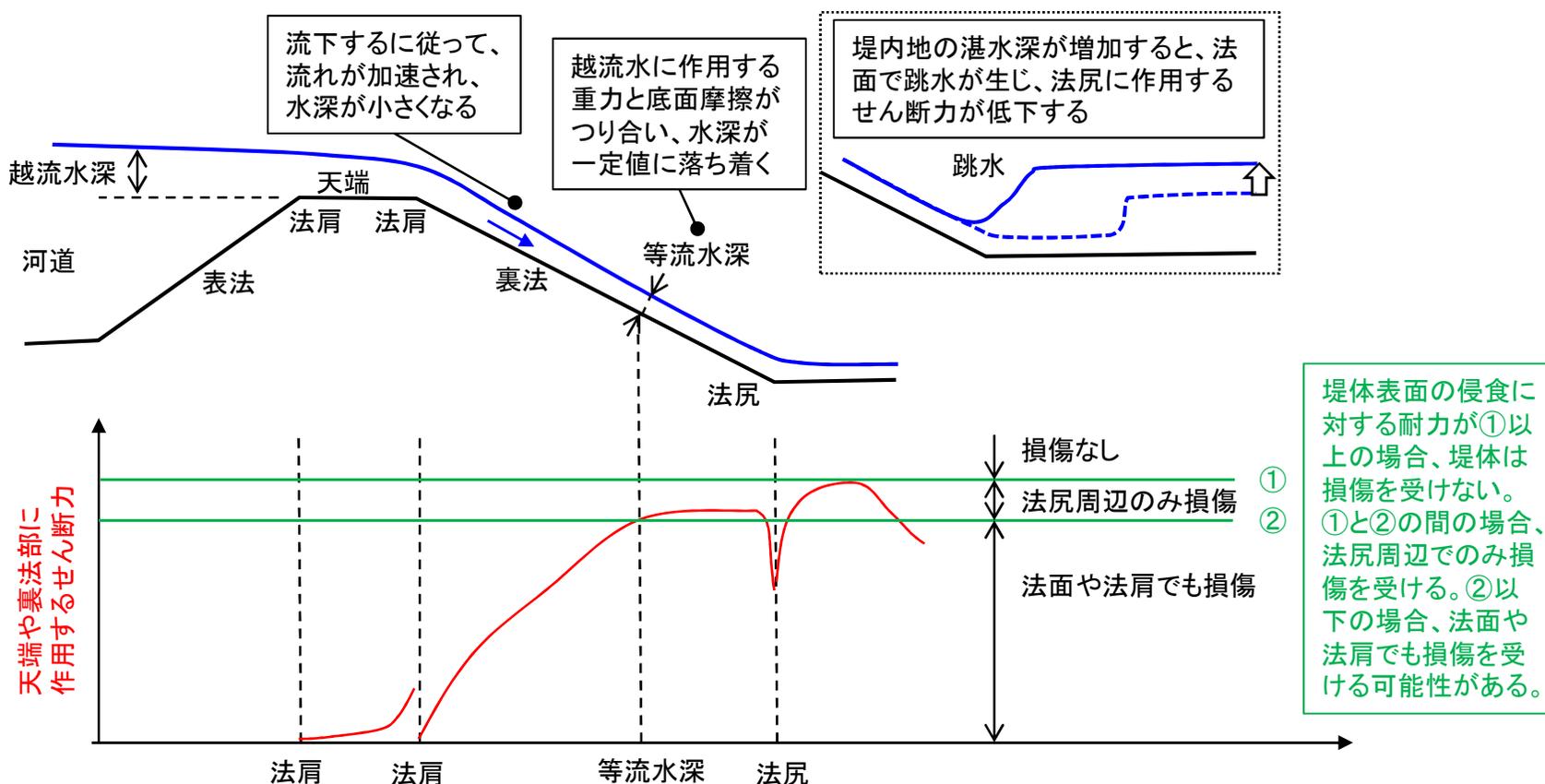
b)天端崩壊過程

土堤の侵食過程

出典)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—, 土木研究所資料, 第2074号, 1984.

越水による河川堤防の侵食機構

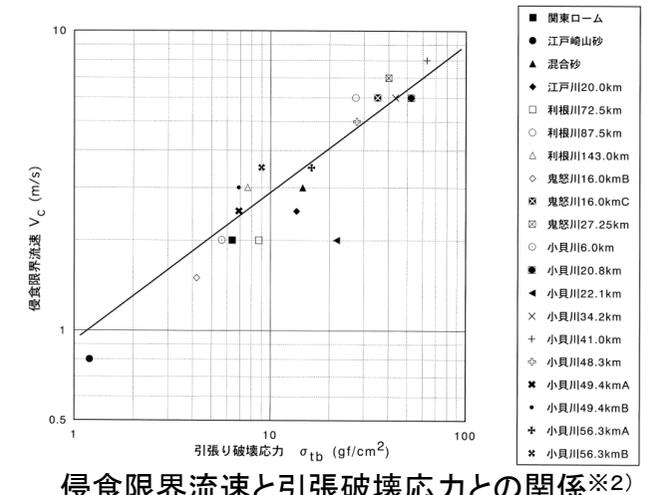
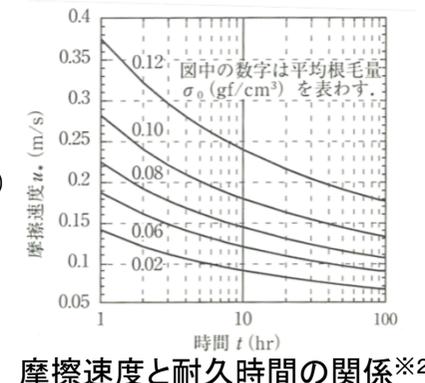
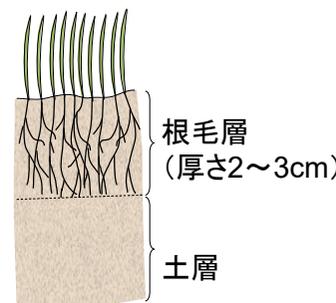
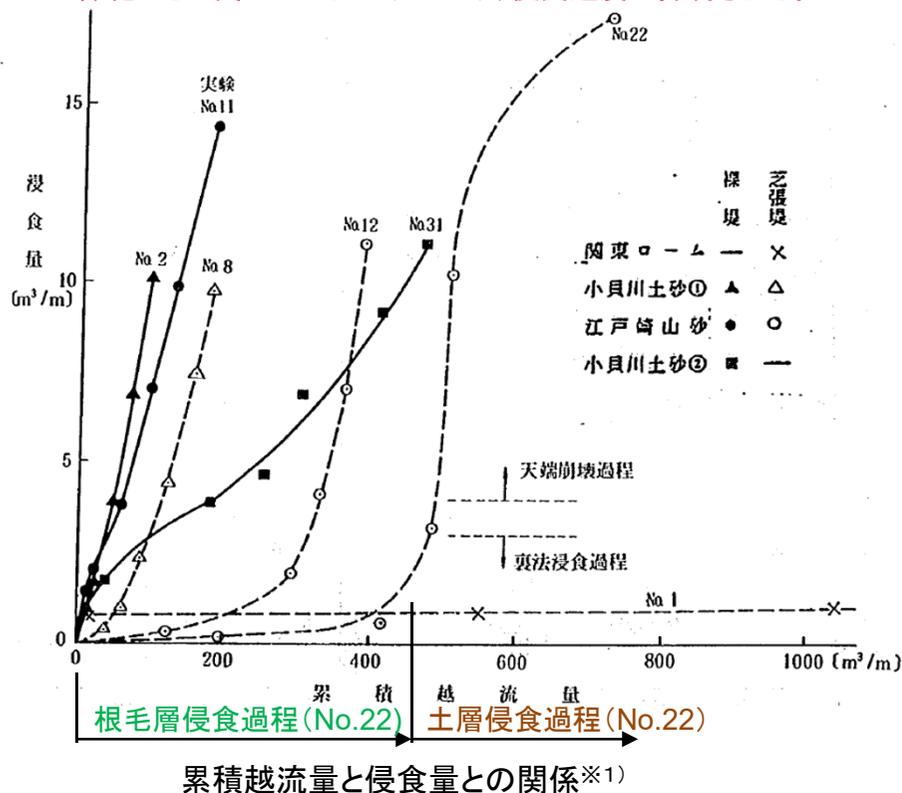
- 堤防天端や法面に作用するせん断力は、天端では表法肩から裏法肩にかけて、法面では法肩から法尻にかけて流れが加速し、堤体法面に作用するせん断力が増加する。越流水に作用する重力の法面勾配方向成分と底面摩擦がつり合うと等流状態になり、それより法尻側ではせん断力は極端に大きくならないが、法尻で最も大きなせん断力が作用する。
- 越流水深の増加に伴って、せん断力が増加すると、まずは法尻に作用するせん断力が法尻の侵食に対する耐力を上回ることから、法尻補強が重要と考えられる。さらに、越流水深が増大すると、法面に作用するせん断力が法面の侵食に対する耐力を上回ることから、法面補強が重要と考えられる。
- 一方で、堤内地の湛水深が増加すると、法尻に作用するせん断力は低下する(ウォータークッション効果)。



堤防表面の侵食過程

- 堤防法面及び法尻には、一般的に芝が植えられており、表層2~3cm程度の根毛層がある。
- 法面及び法尻の侵食過程は、根毛層の侵食段階(根毛層侵食過程)と土層の侵食段階(土層侵食過程)に分けることができる。
- 根毛層侵食過程については、平均根毛量(除草回数等の管理状態によって異なる)をパラメータとして、摩擦速度によって耐久時間を評価できる。
- 土層侵食過程については、土の引張破壊応力から算出される侵食限界流速と法面に作用する流速とを比較することで侵食の進行の有無を評価できる。

※根毛層が流失した後の侵食速度は裸堤と同程度となる。
 ※裸堤でも土質がよければ(No.31)、侵食速度は抑制される。

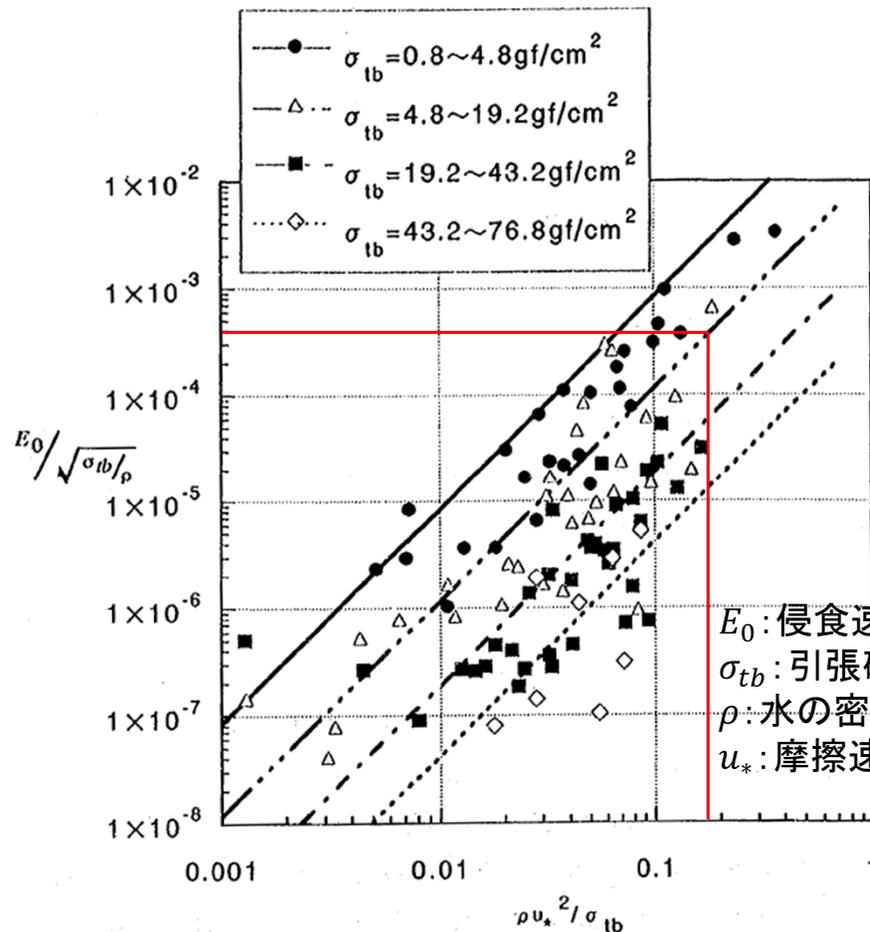


※1) 須賀堯三, 橋本宏, 石川忠晴, 藤田光一, 葛西敏彦, 加藤善明: 越水堤防調査最終報告書一解説編一, 土木研究所資料, 第2074号, 1984.

※2) 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, 深谷涉, 平館治: 洪水流を受けた時の多自然川河岸防護工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料, 第3489号, 1997.

堤体土表面の侵食速度

- 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(宇多ら、1997)。
- 裏法部に流速5m/sの越流水が作用した場合、一般的な引張破壊応力である $\sigma_{tb}=4.8\sim 19.2\text{gf/cm}^2$ を対象とすると、毎分2.4cm侵食される。



裏法面の流速係数を12として裏法面に作用する摩擦速度を算定すると、 $u_* \approx 0.42\text{m/s}$ となる。

$$\frac{\rho u_*^2}{\sigma_{tb}} = \frac{1.0 \times 42.0^2}{10 \times 980} \approx 0.18$$

左図から、横軸の値が0.18の時の縦軸の値を読み取ると、

$$\frac{E_0}{\sqrt{\sigma_{tb}/\rho}} = 4 \times 10^{-4}$$

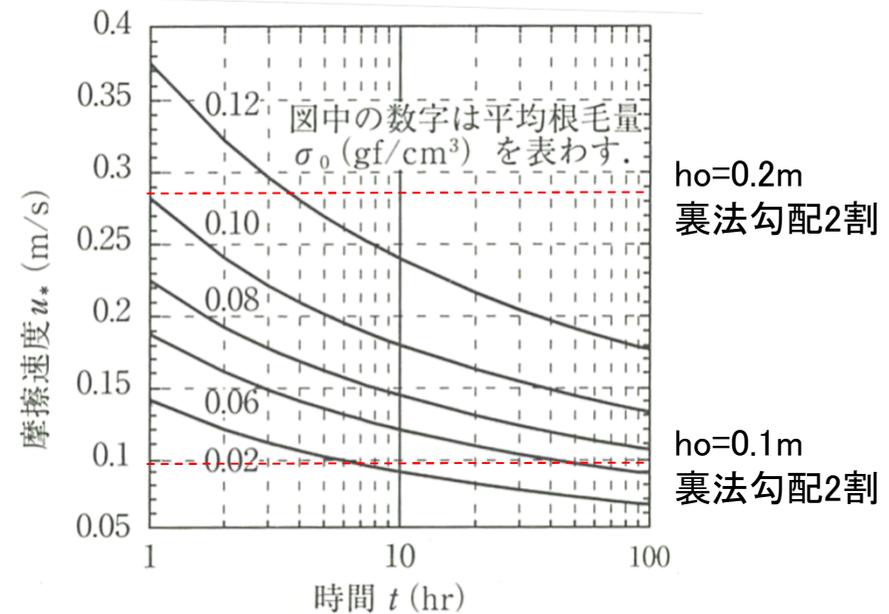
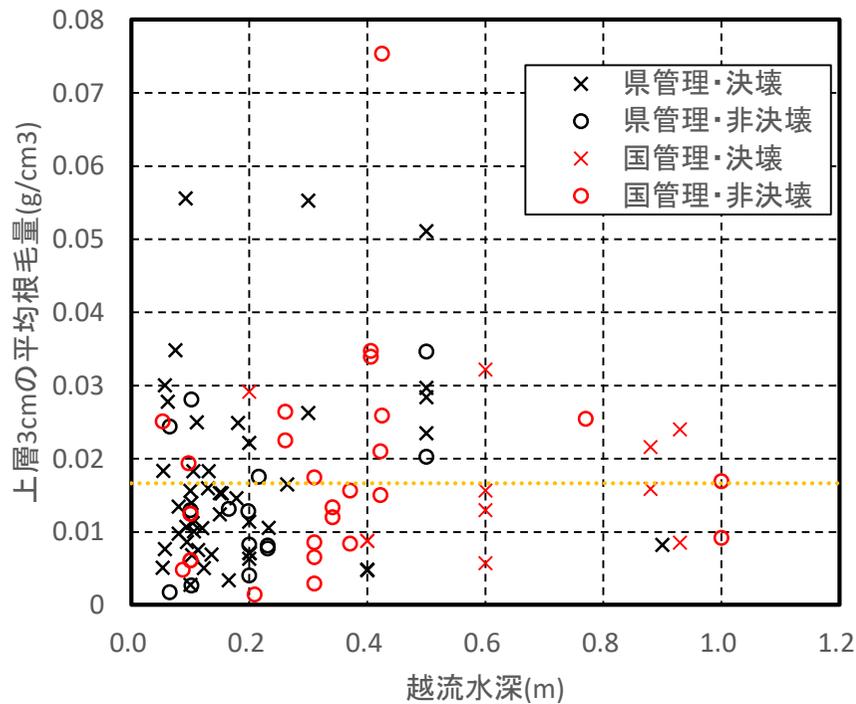
$$E_0 = \sqrt{10 \times 980 / 1.0} \times 4 \times 10^{-4} \\ \approx 0.04(\text{cm/s}) \\ = 2.4(\text{cm/min})$$

図 堤体土表面の侵食速度と作用摩擦速度との関係

出典)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, 深谷涉, 平舘治: 洪水流を受けた時の多自然型河岸防衛工・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—, 土研資料3489号, 1997.

堤防裏法部における芝等の植生の平均根毛量の調査結果(東日本台風事例)

- 東日本台風で決壊した箇所近傍、及び越水したが決壊しなかった箇所、合わせて82箇所を対象として、裏法部における植生の根毛量調査を実施した。
- 越流水に耐侵食力に効果を発揮する上層3cmの平均根毛量は、国管理区間の方が県管理区間に比べて多少大きいですが、いずれも $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 以下、平均では $0.017\text{g}/\text{cm}^3$ であった。
- これは、植生表面に作用する摩擦速度と侵食に掛かる時間を整理した図から評価すると、越流水深10cm、裏法勾配2割であれば6時間程度耐える状況であるが、越流水深が20cmになると耐侵食性をほとんど発揮しない。



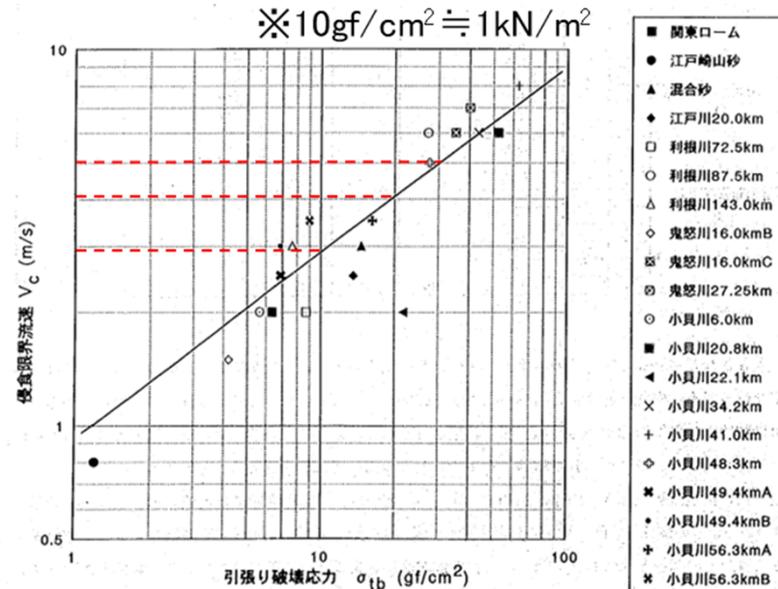
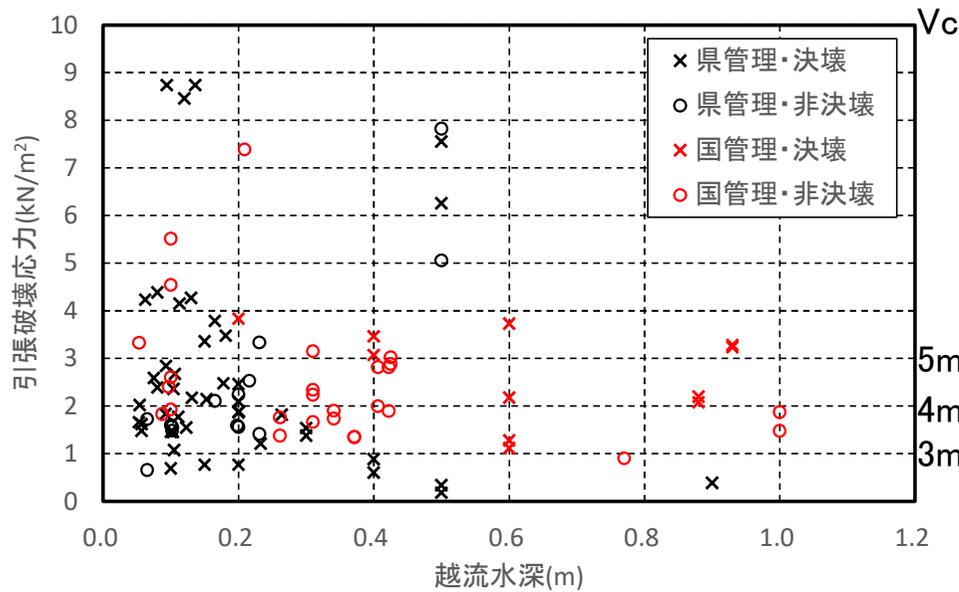
深度2~3cm (主根/根毛)



深度8~9cm (根毛/根毛)

堤体裏法部における堤体土の引張破壊応力の調査結果(東日本台風事例)

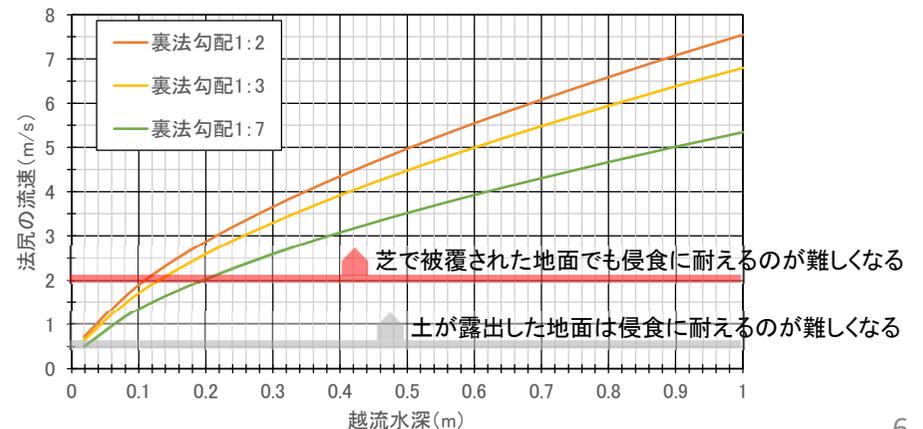
- 同82箇所において、堤体土の引張破壊応力を調査した結果、ほとんどが 1kN/m^2 以上であった。
- 引張破壊応力が 2kN/m^2 では、流速 4m/s が侵食限界となり、天端から 2m 程度流下したあたりで侵食が始めると予想される。非決壊の堤防の被災状況を確認すると、法面下部や法尻で侵食されている堤体の引張破壊応力は大きい。



侵食限界流速と引張破壊応力との関係



引張破壊試験の実施状況



堤防高や堤体裏法表面の耐侵食性の違いに応じた越水時の侵食開始箇所のカテゴリ

- 堤体土の引張破壊応力が比較的小さい名蓋川の決壊箇所上下流では、法肩付近の侵食が顕著であった。
- 堤体土の引張破壊応力が比較的大きい那珂川や千曲川の越水箇所では、法尻付近の侵食が顕著であった。

法肩部の侵食が顕著な事例



裏法肩部での侵食状況

鳴瀬川水系名蓋川決壊箇所(R1T19で決壊)
 $\sigma=0.35\text{kN/m}^2 \rightarrow Vc=1.5\text{m/s}$ 程度

法尻部の侵食が顕著な事例



那珂川水系那珂川19.5k付近左岸
 $\sigma=2.3\text{kN/m}^2 \rightarrow Vc=4.0\text{m/s}$ 程度



信濃川水系千曲川79.0k付近左岸
 $\sigma=4.1\text{kN/m}^2 \rightarrow Vc=6.0\text{m/s}$ 程度

堤内地の状況が壊れ方に与える影響

- 堤内地の地被の状態によって、法尻部周辺の平場の侵食状況が異なる。
- 堤内地が湛水している場合、法尻周辺は侵食されにくい。
- 本支川合流部などの隅角部、坂路部や天端幅が異なる箇所など、堤防裏法部で越流水が集中する箇所では相対的に侵食されやすい。



法尻部が道路舗装で被覆された状況
(信濃川水系千曲川75.6k付近左岸)

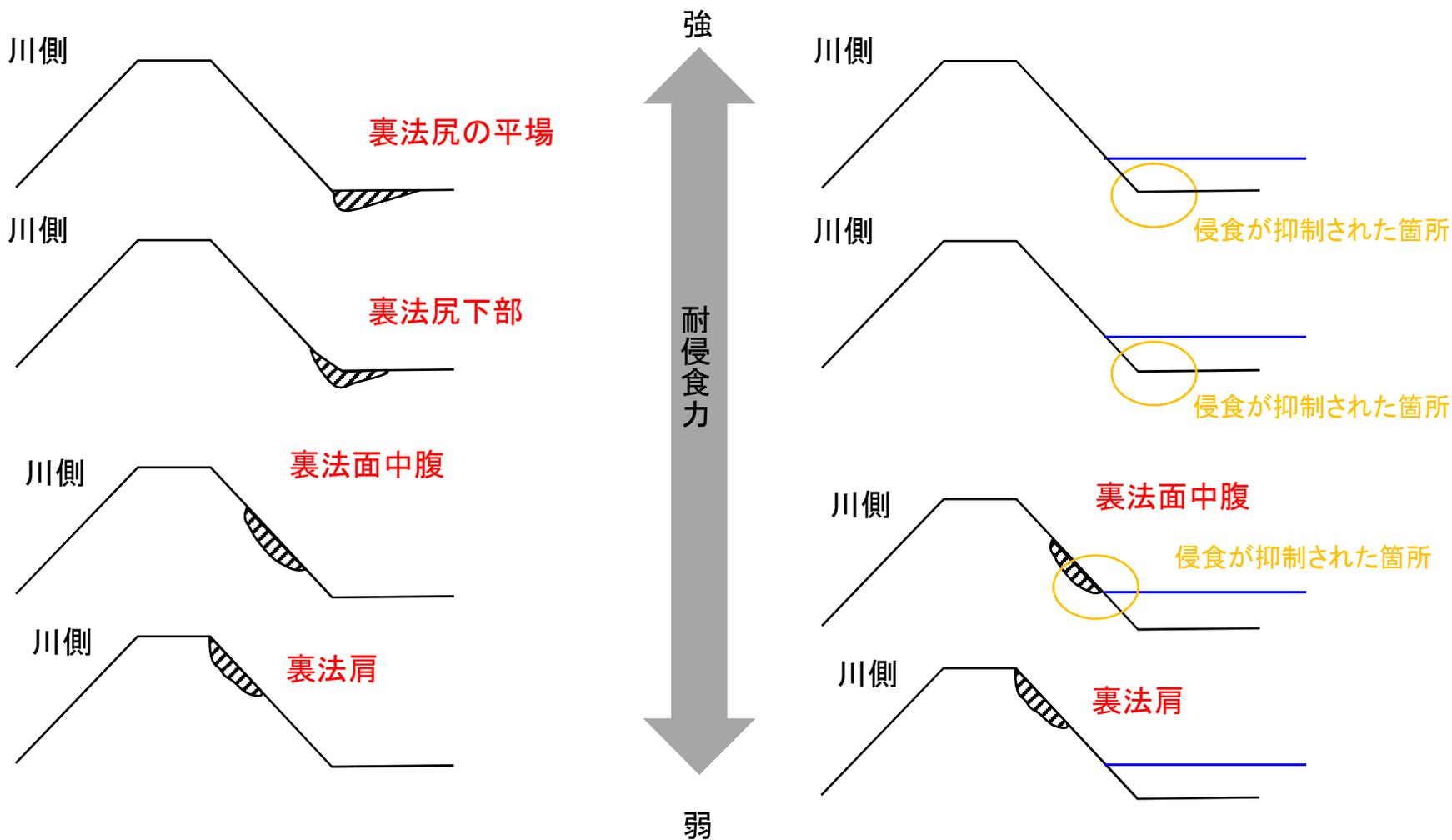


堤内地の湛水によって法尻周辺の侵食が抑制された事例
(阿武隈川水系内川左岸)



堤体裏法部の耐侵食性や堤内地湛水状況によって変化する越水時の侵食開始位置

- 裏法面を流れる越流水の流速が堤体裏法部の耐侵食力を上回ると、裏法面の侵食が始まる。
- 湛水によって越流水の流勢が弱められ、裏法部や法尻の侵食が軽減される場合がある。

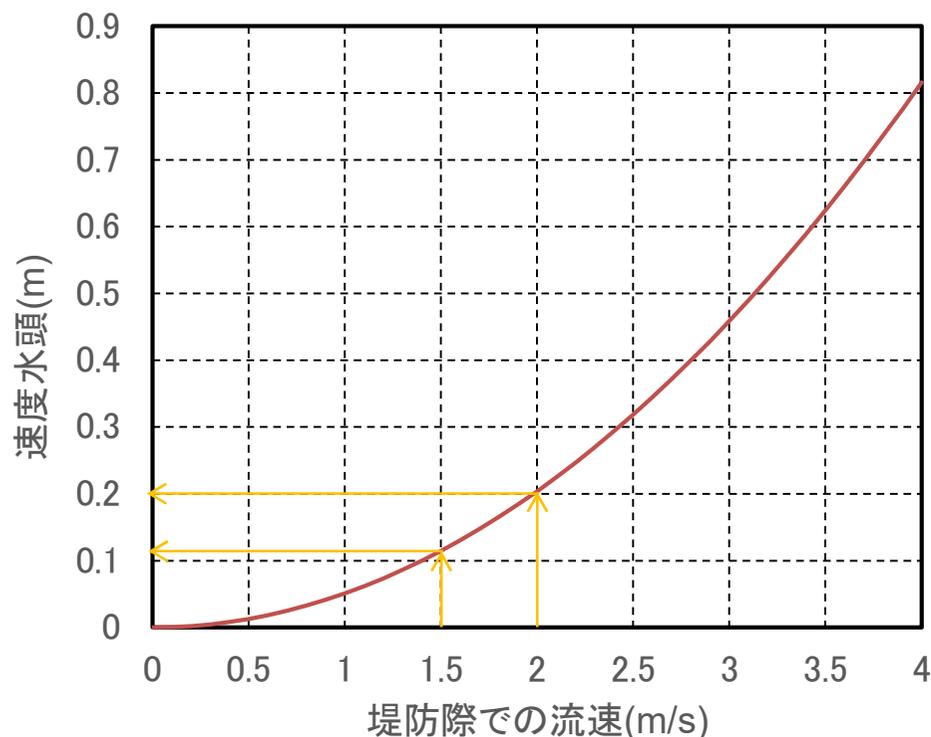


【越水開始時に堤内地の湛水なし】

【越水開始時に堤内地の湛水あり】

堤防際の流れが速い場合の越流水深の換算

- 急流河川や湾曲部外岸では、堤防際でも速い流れが生じる場合があり、裏法部に作用する越水外力として、見かけの越流水深に速度水頭を加味して評価する必要がある。
- 堤防際での流速と速度水頭との関係は下図の通りであり、堤防際での流速が1.5m/sとなると、見かけの越流水深に0.11m程度が高くなったことに相当する。堤防際の流速が2m/sでは見かけの越流水深が0.2m程度高くなったことに相当し、粘り強い堤防構造の目標外力が0.3m程度であることを考えると、その影響は大きい。
- なお、堤防際での流れの向きは、厳密に言うと堤防に直角に流れる方向ではないが、ここでは簡単のため堤防に直角に向かう流れとして速度水頭を評価した。
- 那珂川60.5kp右岸では越水によって堤防天端が被災。堤内地は越水直後の湛水したため被災していない(CCTV画像で確認済み)



那珂川60.5kp右岸での天端舗装の被災状況

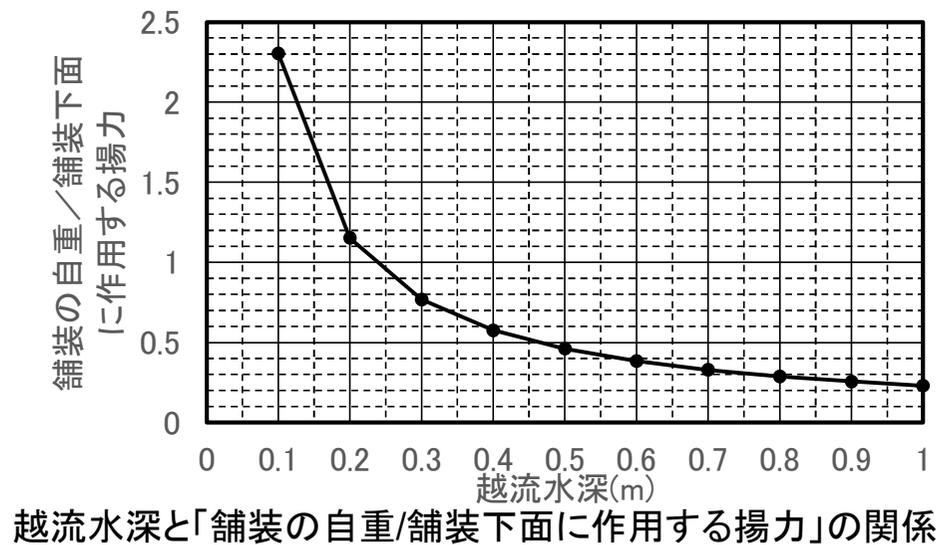
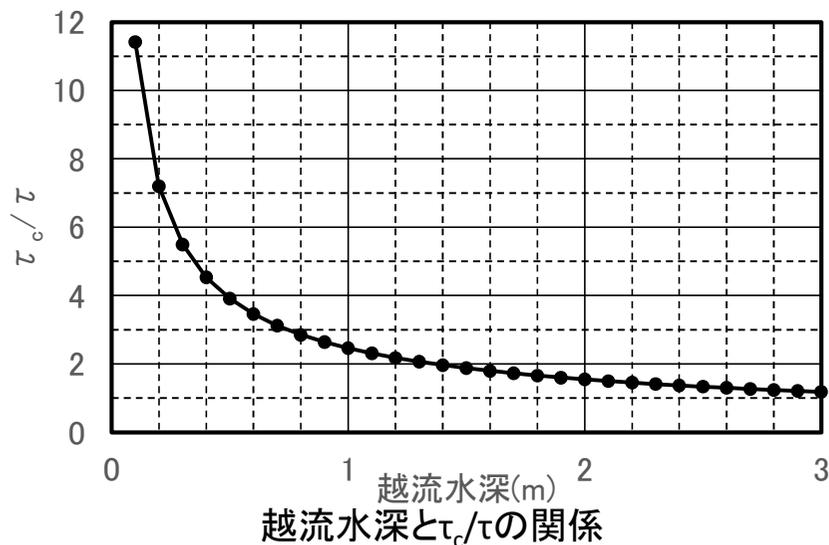
天端舗装面の越流水に対する耐侵食力

- 舗装面の耐侵食力は、経年劣化が進んだ状態で約 80N/m^2 以下であれば、表面の侵食が生じないことが確認されている(宇多ら、1993)。以下では、舗装面の侵食限界せん断力 $\tau_c = 80\text{N/m}^2$ として、越水に対する舗装面の安定性を確認する。
- 越水時には、裏法肩で限界水深が生じると考えられるが、越流水深が小さい場合には、表法肩で限界水深となる。後者の方が天端に作用するせん断力が大きくなるため、後者の想定で越流水深を変えて、天端に作用するせん断力 τ と侵食限界せん断力 τ_c との関係を調べた。その結果、越流水深が3m程度になっても舗装面は侵食されない。
- 一方で、宇多ら(1993)の実験では、舗装面下へ越流水が浸透する影響は想定していない。河川水位が舗装面下に作用し、裏法面から流出していない状況を想定すると、天端上の越流水の速度水頭が舗装に揚圧力として働くこととなる。越流水深を変えて、舗装に作用する揚力と舗装(厚さ5cm)の自重を比較すると、越流水深が22cm程度を超えると舗装が浮き上がる。亀裂等の入っていない舗装であれば、一部の舗装が浮き上がっても容易には流出しないと考えられる。



出典)宇多高明, 藤田光一, 佐々木克也:道路内の流水による舗装面の破壊, 土研資料3226号, 1993.

越水時の堤防天端上の水深の変化



粘り強い河川堤防の構造

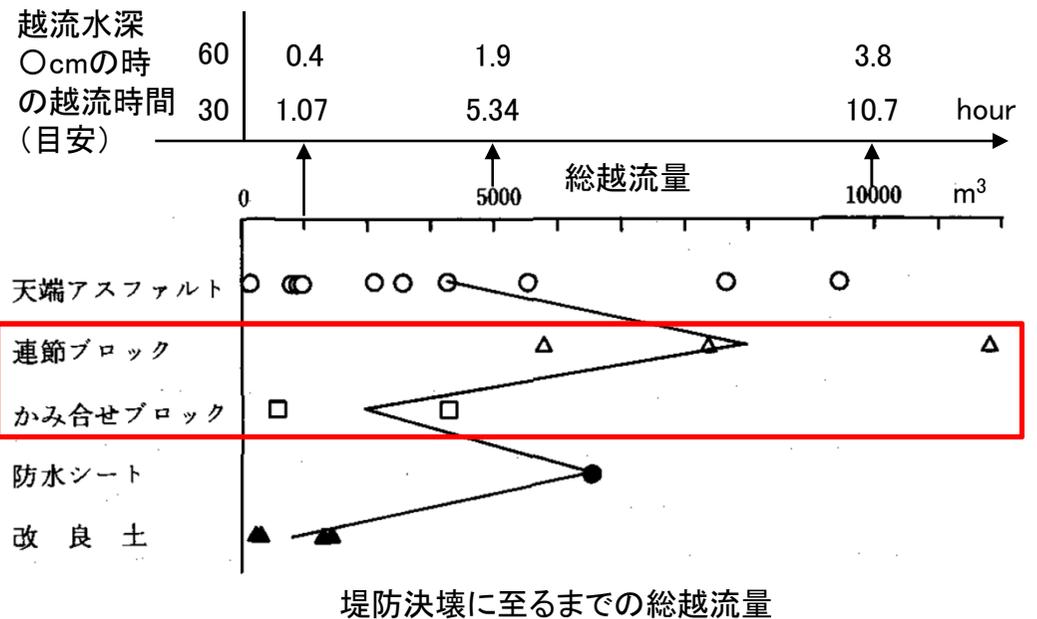
表面被覆型堤防の壊れ方(既往の知見と課題)
～主に、ブロック+吸出防止シートを中心として～

大型堤防模型実験の結果

- 法面及び法尻保護工として、連節ブロック、かみ合わせブロック、遮水(防水)シート、改良土を用いて、その効果を大型堤防模型実験(堤高2.5m)によって検証。
- 天端アスファルト(天端のみ保護)については、裏法侵食後の天端崩壊過程の進行を遅らせるものとして採用。
- 効果を単純に比較すると、連節ブロック>遮水(防水)シート>天端アスファルト>かみ合わせブロック>改良土の順となったが、例えば、ブロック同士の連結方法を工夫するなど、堤防の破壊過程を踏まえて改善を行うことで、少ない総越流量で決壊する状況をなくすことができ、また、データのバラツキを小さくできる可能性がある。
- 連節ブロック及びかみ合わせブロックが吸出防止シートをブロックで押さえる工法に該当。

堤防強化工法の概略

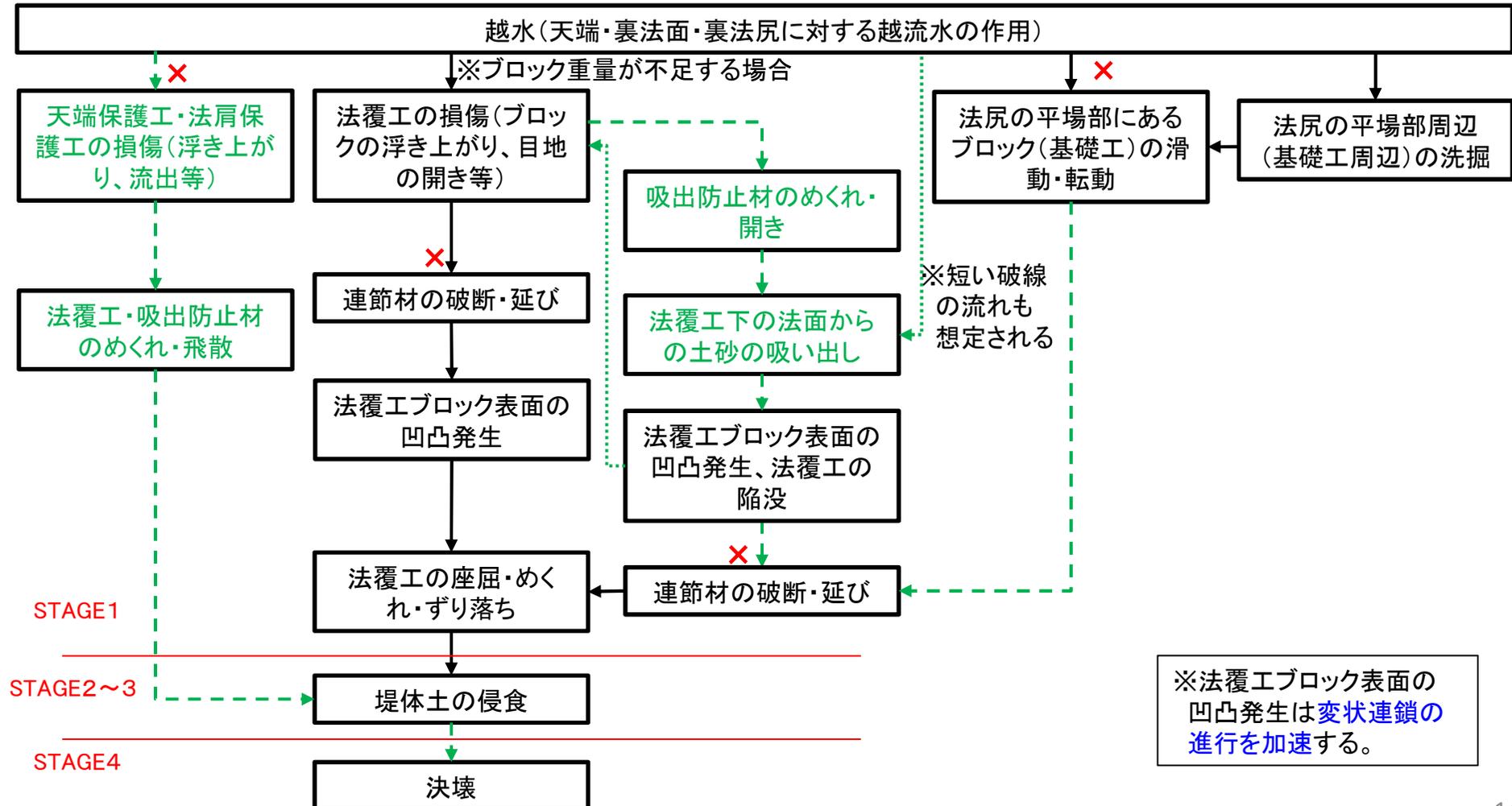
保護工	構造一般図	材料項目一般	摘要
天端アスファルト (10ケース)		密粒度アスファルト 粗粒度アスファルト 砕石	遮水壁の設置、 ロープの埋設の 効果の検討
連節ブロック (4ケース)		460 200 吸出防止材 改良土	鉄線、ロープに よる連結、改良 土を用いた場合 の検討
かみ合せブロック (2ケース)		500 500 吸出防止材	かみ合せ効果 の検討
防水シート (2ケース)		1mm厚合成ゴム シート	シートの設置方 法の検討
改良土 (4ケース)		砂質土：消石灰 1 : 10 (重量比) 粘性土：アスファルト 乳剤 1 : 10 (重量比)	改良剤、施工方 法の検討



出典)加藤善明, 橋本宏, 藤田光一: 堤防の耐越水化に関する実験的研究、第29回水理講演会論文集、1985。

変状連鎖図(連節ブロックによる法面保護工の場合)

- 連節ブロックによる法面保護工の壊れ方を確認し(次頁)、以下の6つの変状を確認。
- 1)法尻の平場部にあるブロックの滑動・転動、2)法覆工ブロックの浮き上がり、3)法覆工ブロックの隙間やシート継ぎ目からの堤体土の吸い出し、4)法覆工ブロック表面に凹凸発生、5)法覆工の変形に伴う連節材の延び、6)法覆工の陥没
- こうした変状を参考にして、変状連鎖図を作成。ただし、**想定(緑線、緑字)**を含む。
- なお、決壊までの時間が短くなる、避けるべき変状として、**×印**を抽出した。

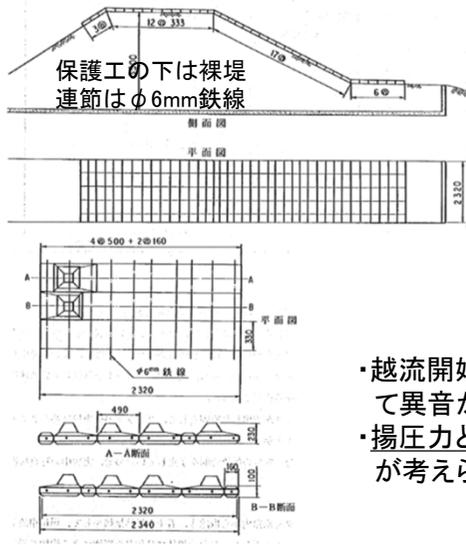


越水時の堤防の壊れ方(法面保護工として連節ブロックを使った場合 4ケース)

※推測を含む

- 1)法尻の平場部にあるブロックの滑動・転動 2)法覆工ブロックの浮き上がり 3)法覆工ブロックの隙間やシート継ぎ目からの堤体土の吸い出し 4)法覆工ブロック表面に凹凸発生 5)法覆工の変形に伴う連節材の伸び 6)法覆工の陥没

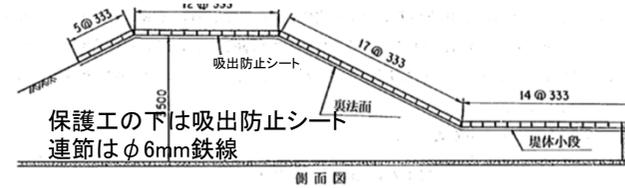
凸型連節ブロック (0.88m³/s/m、Σt=1.5min)



q=0.88m³/s/m Σt=1.5min

- ・越流開始1分で裏法尻から下流部において異音が発生し水しぶきが上がる
- ・揚圧力と突起による抵抗が大きかったことが考えられる

平型連接ブロック (0.57~0.87m³/s/m、Σt=148min)



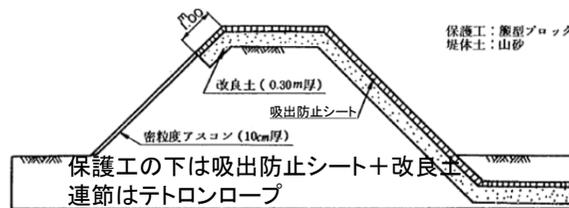
q=0.57m³/s/m Σt=10min



q=0.57m³/s/m t=10min
q=0.87m³/s/m t=32min
Σt=42min

- ・q=0.57m³/s/mに対してはブロックが多少浮き上がる程度で堤体土の吸い出しやブロックの沈下はほぼみられなかった。
- ・裏法尻付近で堤体土が吸い出され隣り合ったブロックが凸凹してきた。吸出防止シートの継ぎ目から堤体土が吸い出されていたがブロックが連結されていたため、保護工の形状にはあまり変化がなかった。

廉型連接ブロック (0.57m³/s/m、Σt=140min)



q=0.57m³/s/m
Σt=60min



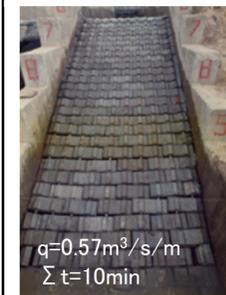
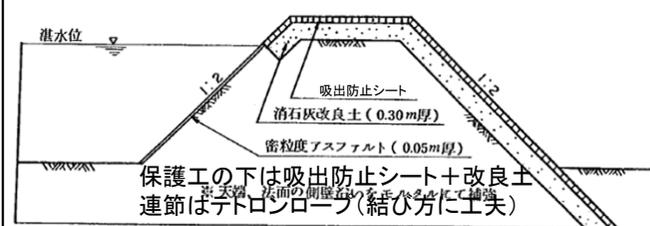
q=0.57m³/s/m
Σt=136min



q=0.57m³/s/m
Σt=140min

- ・裏法尻部に褐色水が見られ、ブロック配列の乱れ、大きな水はねが発生、その後ブロックが連結されたまま沈み込むように沈下したあと二体となって流出
- ・ロープは切れにくい引張りによる伸びがありブロック間に隙間が生じる
- ・裏法面の沈下が見られると崩壊速度は急激に増す

廉型連接ブロック (0.57~0.87m³/s/m、Σt=288min)



q=0.57m³/s/m
Σt=10min



q=0.57m³/s/m t=180min
q=0.87m³/s/m t=60min
Σt=240min

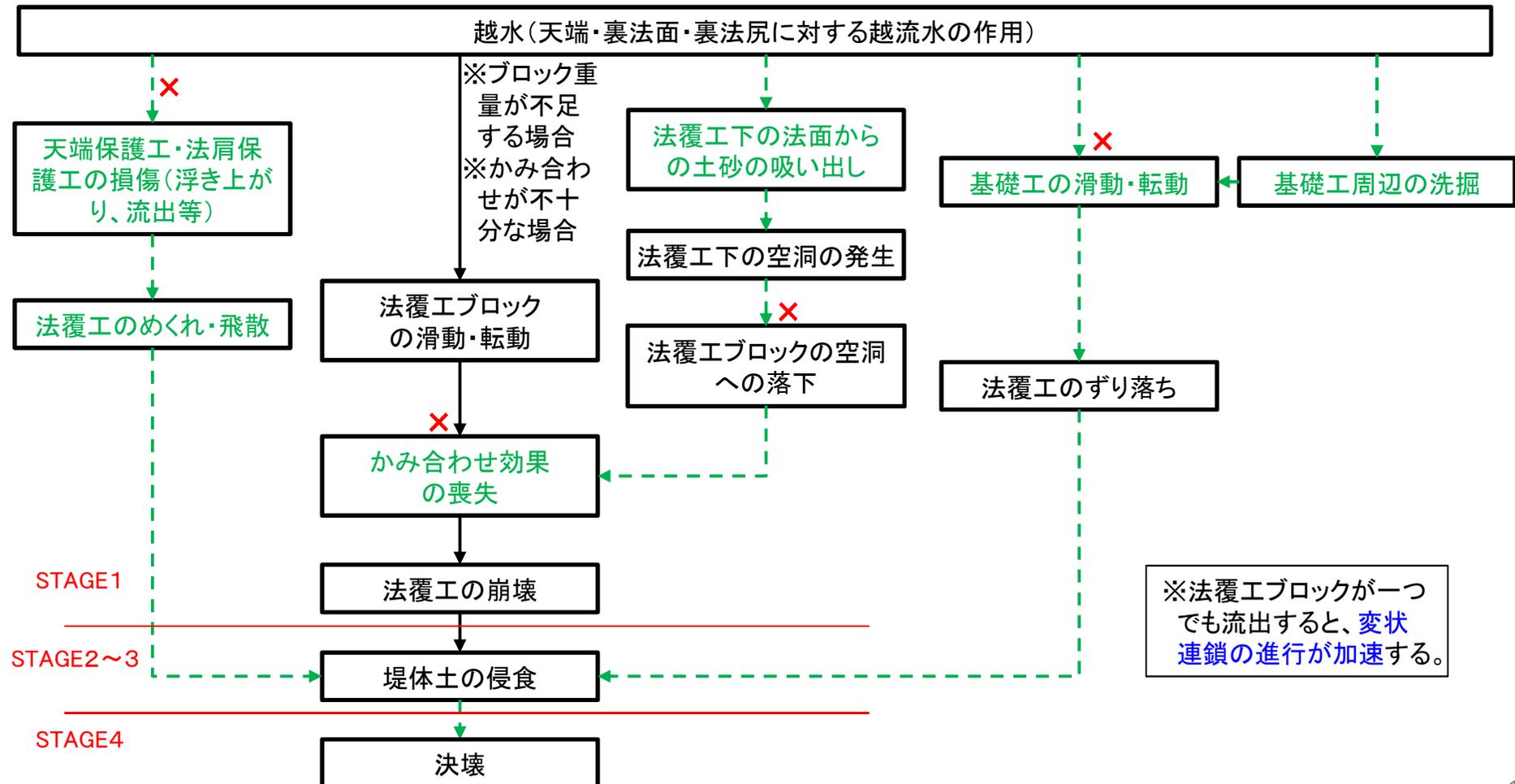


q=0.57m³/s/m t=180min
q=0.87m³/s/m t=108min
Σt=288min

- ・通水10分で裏法尻ブロックに隙間が生じ、法尻吸出防止シートが流出するもその後流水は安定し改良土の流出もばらくない。
- ・裏法尻から平場にかけてのブロックが浮き上がり隙間が徐々に大きくなった。
- ・吸出防止シートと改良土により吸い出しは緩慢
- ・ブロックは一塊となって流出

変状連鎖図(かみ合わせブロックによる法面保護工の場合)

- かみ合わせブロックによる法面保護工の壊れ方を確認し(次頁)、以下の4つの変状を確認。
- 法覆工下に空洞の発生、2)法覆工下に形成された空洞へのブロックの落下、3)一つのブロックの流出をきっかけとした法覆工の崩壊、4)吸出防止シート下からの堤体土の吸い出し
- こうした変状を参考にして、変状連鎖図を作成。ただし、**想定(緑線、緑字)**を含む。なお、かみ合わせブロックは“個々の重量”と“かみ合わせ”によって越流水による流体力に抵抗しているため、1個でも流出すると、他のブロックも変形・移動しやすくなるようである。
- なお、決壊までの時間が短くなる、避けるべき変状として、**×印**を抽出した。

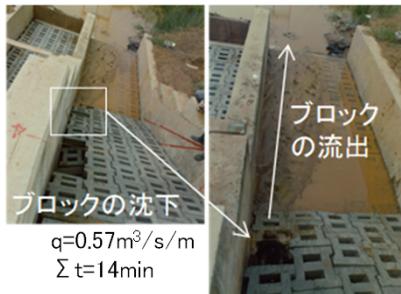
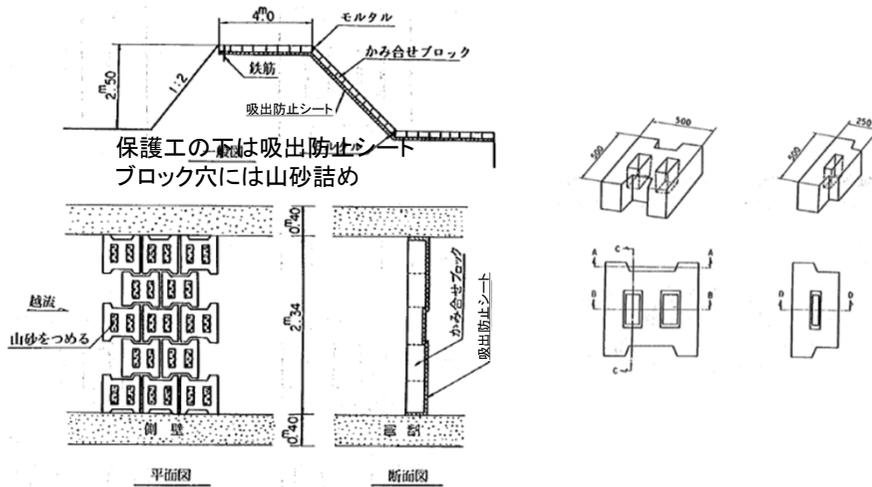


越水時の堤防の壊れ方(法面保護工としてかみ合わせブロックを使った場合 2ケース)

※推測を含む

- 1) 法覆工下に空洞の発生 2) 法覆工下に形成された空洞へのブロックの落下 3) 一つのブロックの流出をきっかけとした法覆工の崩壊
 4) 吸出防止シート下からの堤体土の吸い出し
 ※かみ合わせブロックは“個々の重量”と“かみ合わせ”によって抵抗しているため、1個でも流出すると、他のブロックも変形・移動しやすくなるようである。

かみ合わせブロック ($0.57\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $\Sigma t=16.5\text{min}$)



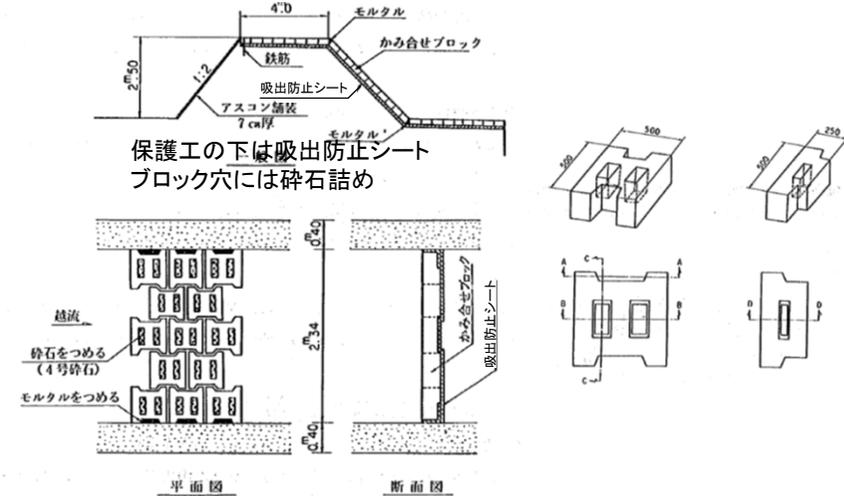
ブロックの沈下
 $q=0.57\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
 $\Sigma t=14\text{min}$



$q=0.57\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
 $\Sigma t=16.5\text{min}$

- ・連節ブロック同様、越水開始直後の保護工上の流れは非常に滑らか
- ・裏法尻付近の左側側壁沿いブロックが流出するとともに上流側ブロック3個が陥没
- ・かみ合わせブロックはそれぞれが互いに強くかみ合っているため、堤体変形に追従したブロックの沈下が生じにくく、空洞はますます大きくなる
- ・陥没したブロック下の土砂が大きく侵食され、その後、上流側のブロック下の土砂の流出が急激に進行

かみ合わせブロック ($0.57\sim 0.88\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $\Sigma t=73\text{min}$)



- ・ $q=0.57\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ では崩壊のきざしが全くなかったため通水を30分でやめ、 $q=0.88$ に変更
- ・ $q=0.88\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ に変更後、通水40分で裏法尻付近より濁水があり、ブロックのかみ合わせに異常はなかったが、裏法中央部の吸出防止シート下の堤体土が5cm流出
- ・上記から1分後にブロックが2個流出、ブロック下の堤体土が洗掘された。
- ・さらに1分後、ブロックが全て落ち、その後平場ブロックのみ残して破堤

連節ブロック、かみ合わせブロックで被覆した実験の詳細

- 連節ブロック、かみ合わせブロックの過去の越水実験を確認したところ、越水直後に表面被覆材が剥離し通常の土堤のように直ぐに決壊に至る事例があった一方で、表面被覆材の固定や法肩や法尻での接続が適切に実施されることで表面被覆材が植生根毛層と同様な効果を発揮する事例があった。
- 表面被覆材が流出するまでの時間が異なるのは、表面被覆材の構造に加え、堤体土の種類、越水のさせ方によるものと考えられる。
- 越水実験に先立って、河川側を3日から7日湛水させ、降雨や河川水の影響を考慮した実験としている。浸潤線は裏法尻程度であり、越流水に対する堤体土の耐侵食性に影響した可能性がある。

No	表面被覆材	堤体土の種類	天端幅(m)	法勾配		湛水期間(day)	単位幅流量(m ³ /s)	通水時間(min)	総越流量(m ³)	実験結果の概略
				表	裏					
1	凸型連節ブロック	小貝川土砂①	4	1:2	1:2	7	0.87	0.5	80	・越水直後にブロックが滑動(滑り落ちる)
							0.1	9		
2	平型連節ブロック	小貝川土砂①	4	1:2	1:2	7	0.57	10	7389	・越水後の変化小 ・越水後、堤体土が徐々に抜け出し、32分、80分にブロックの連節材(鉄線)が切れ、ブロックの一部が流出
							0.87	135		
3	廉型連節ブロック	江戸崎山砂	4	1:2	1:2	3	0.57	140	4788	・堤体土が徐々に抜けだし、ブロックに沈下・変形後にブロックが流出する
4	廉型連節ブロック	小貝川土砂②	4	1:2	1:2	3	0.57	180	11794	・堤体土が徐々に抜けだし、ブロックに沈下・変形後にブロックが流出する
							0.87	108		
5	かみ合わせブロック	江戸崎山砂	4	1:2	1:2	7	0.57	16.5	564	・堤体土が徐々に抜けだし、かみ合わせがはずれる
6	かみ合わせブロック(吸出し防止側壁との接合や改良)	江戸崎山砂	4	1:2	1:2	7	0.57	30	3271	・堤体土が徐々に抜け出し、かみ合わせがはずれる
							0.87	40		

※小貝川土砂は、河川敷から採取した土砂であり、砂:シルト・粘土=8:2程度

吸出防止シートによる裏法面の侵食防止効果の確認実験

- 高さ2.3m、幅3m、裏法勾配3割の堤防模型を製作し、越流水深30cm、越流時間3時間を目安に越水実験を行い、裏法面の侵食状況を確認した。
- 裏法面保護工のない実験では、越流時間3時間で法面が侵食が1m程度進んだが、裏法面を吸出防止シートで保護した場合には越流時間3時間も法尻付近の一部が侵食されたのみであった。
- なお、ここで使用した吸出防止シートは、厚さ1.02cm、透水係数0.186cm/sであった。

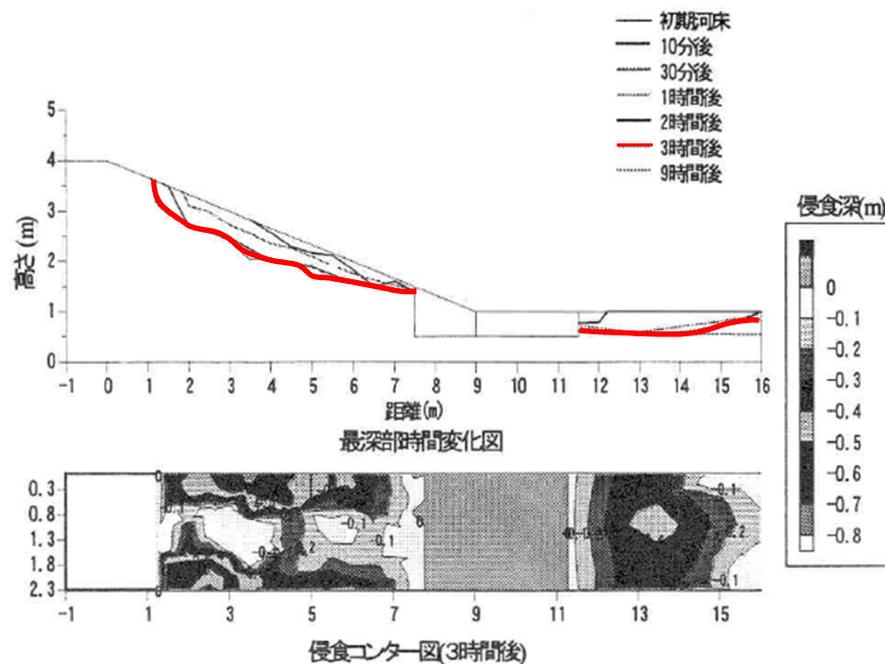


図 越水時の裏法面の侵食状況
(裏法面保護工を設置しないケース)

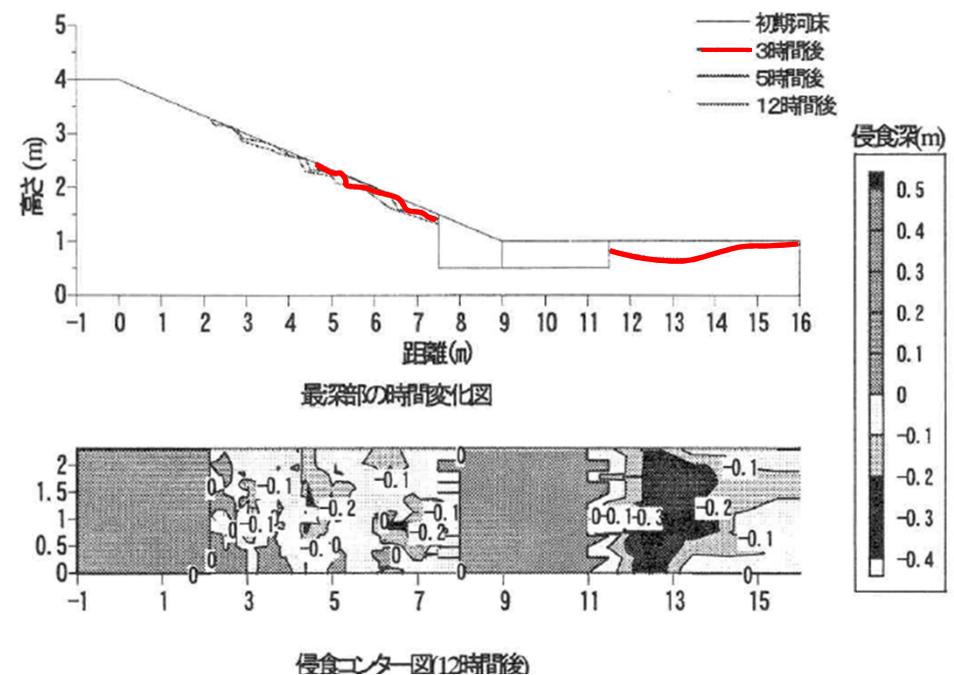


図 越水時の裏法面の侵食状況
(裏法面保護工として吸出防止シートを設置したケース)

出典)藤田光一, 末次忠司, 諏訪義雄, 東高德, 白戸正美, 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巻, pp.109-114, 2001. (補足説明文・図の追加を実施)

越水時に生じる吸出防止シート下の流れ

- 高さ3m、幅0.5mの堤防模型を使い、越水時に生じる吸出防止シートの上層と下層の流速を計測。
- 越流水深を変えると、上層の流速は3.0m/sから5.0m/sと大きくなるが、下層の流速は1.0m/s程度で変化しない。
- 越流水深30cmで連続通水し、法尻付近の堤体の侵食状況を観察すると、徐々に侵食し土塊の流出に至った。シート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と考えられた。

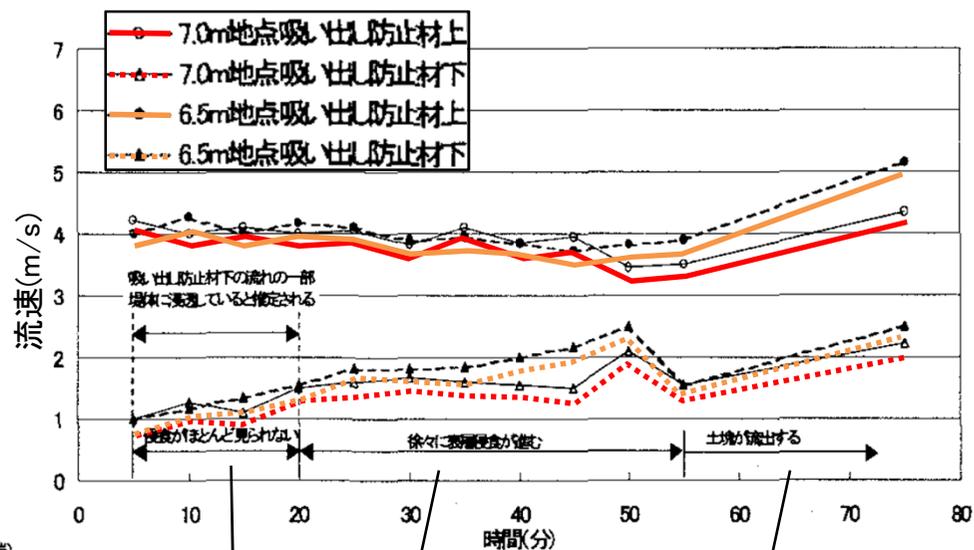
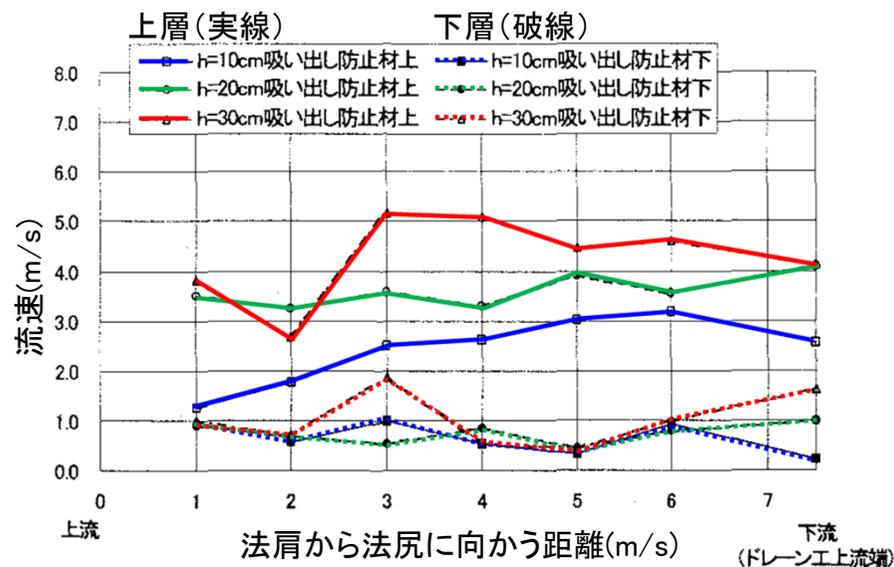


図 吸出防止材上下の流速測定結果

侵食がほとんど見られない
徐々に表層侵食が進む
土塊が流出する

図 法尻付近での流速の経時変化(越流水深30cm時)

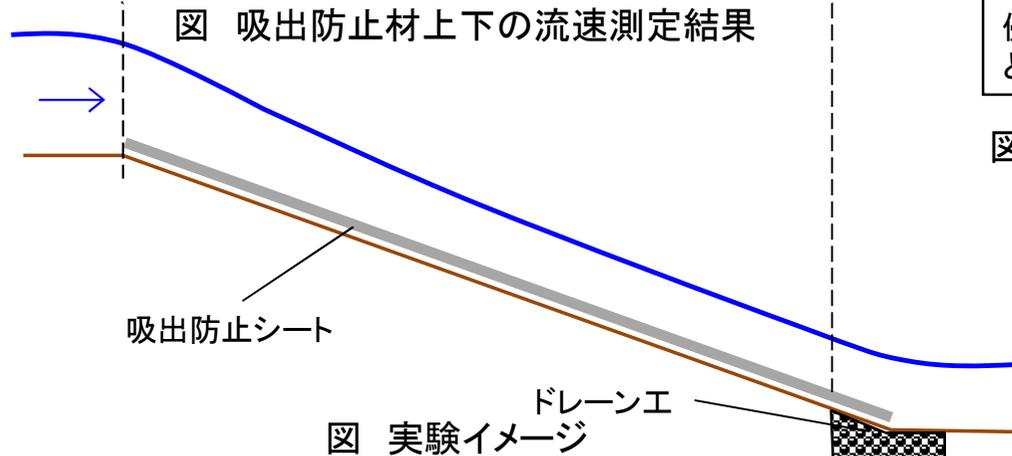
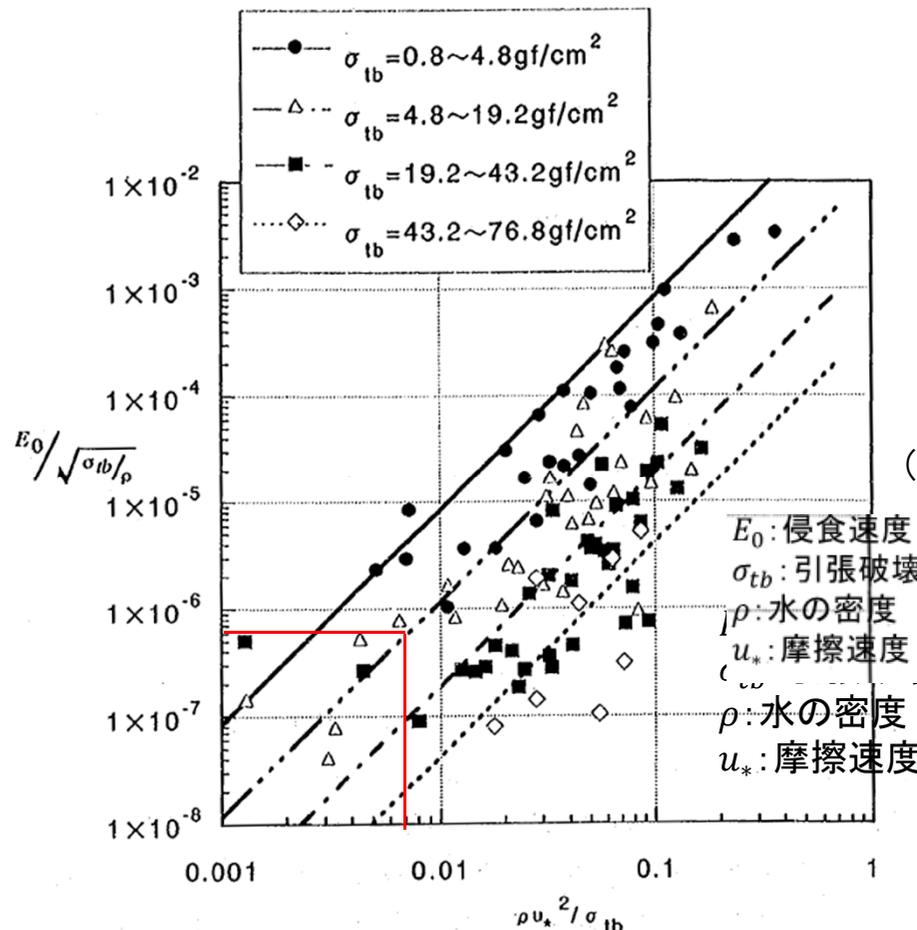


図 実験イメージ

出典) 藤田光一, 末次忠司, 諏訪義雄, 東高德, 白戸正美, 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巻, pp.109-114, 2001. (文字の鮮明化、補足説明文・図の追加を実施)

吸出防止シート下層の流速と堤体表面の侵食速度

- 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(宇多ら、1997)。
- 一般的な吸出防止シート(厚さ1cm、透水係数 10^{-1} cm/s)を用いた場合、シート下の流速は最大で1.0m/s程度(摩擦速度は8.3cm/s程度)であり、堤体土の引張破壊応力が $5\text{kgf/cm}^2 \sim 20\text{kgf/cm}^2$ 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 6.0×10^{-5} cm/s(3時間で0.6cm程度)である。
- 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。



$$\frac{\rho u_*^2}{\sigma_{tb}} = \frac{1.0 \times 8.3^2}{10 \times 980} \approx 0.007$$

$$\frac{E_0}{\sqrt{\sigma_{tb}/\rho}} = 6 \times 10^{-7}$$

$$E_0 = \sqrt{10 \times 980 / 1.0} \times 6 \times 10^{-7} \approx 6.0 \times 10^{-5} (\text{cm/s})$$

(参考)シート下の流速を1.5m/sとした場合、3時間で3cm程度

$$\frac{\rho u_*^2}{\sigma_{tb}} = \frac{1.0 \times 12.5^2}{10 \times 980} \approx 0.016$$

$$\frac{E_0}{\sqrt{\sigma_{tb}/\rho}} = 3 \times 10^{-6}$$

$$E_0 = \sqrt{10 \times 980 / 1.0} \times 3 \times 10^{-6} \approx 3.0 \times 10^{-4} (\text{cm/s})$$

出典)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, 平舘治: 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—, 土研資料3489号, 1997.

図 堤体土表面の侵食速度と作用摩擦速度との関係

吸出防止シート下の隙間と下層流速との関係

- シート下の流れを平板間流れモデルで扱い、前頁の流速を再現すると、隙間高 Δh は0.8cm~1.3cmと推定され、シート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た。
- 堤体表面と吸出防止シートとの隙間高が2.7cm~5.0cm程度になると、シート下層の流速が2m/s近くになり、堤体表面の侵食速度が増大する。

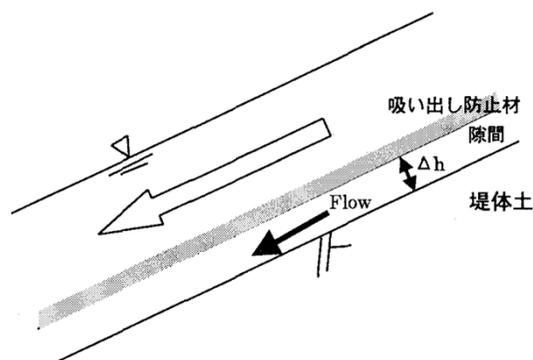


図 平板間流れモデルのイメージ

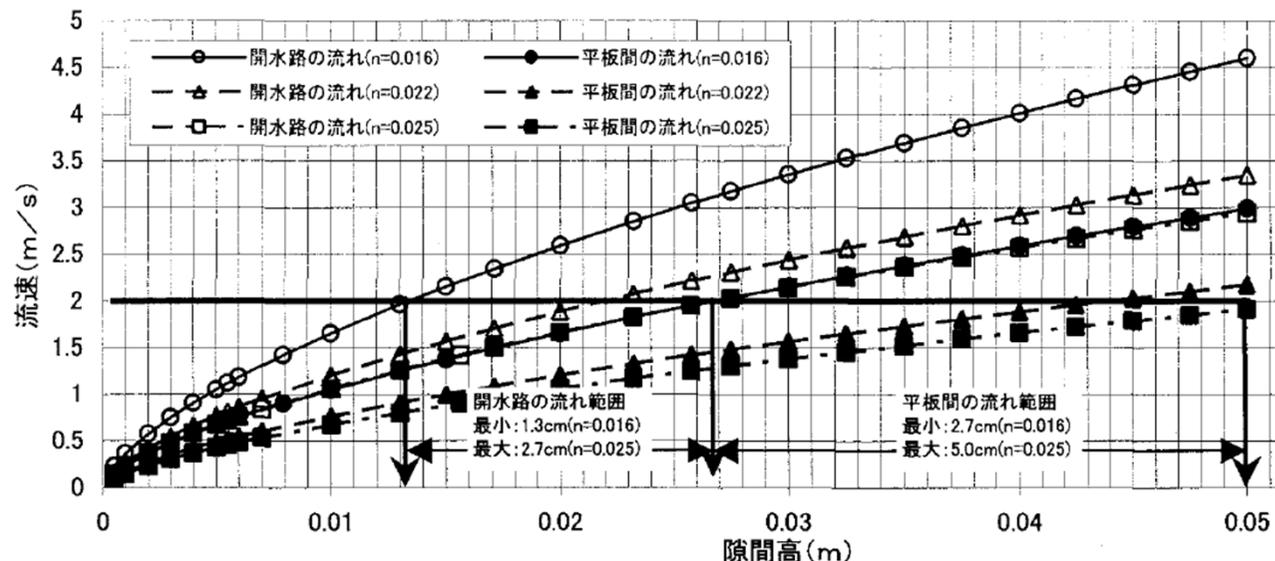
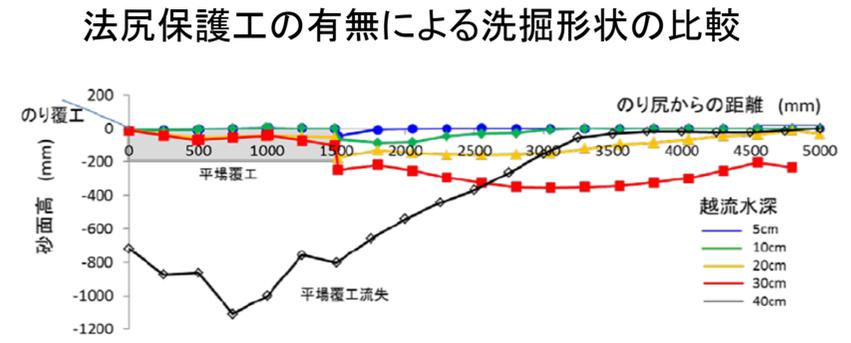
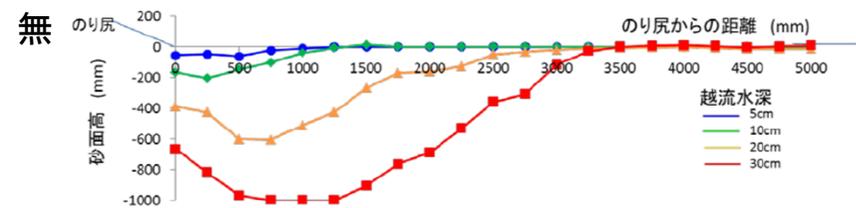
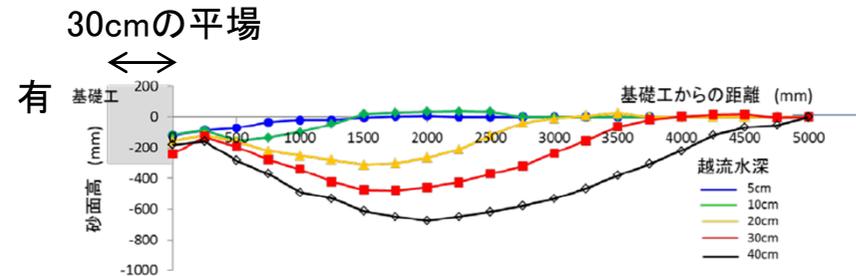
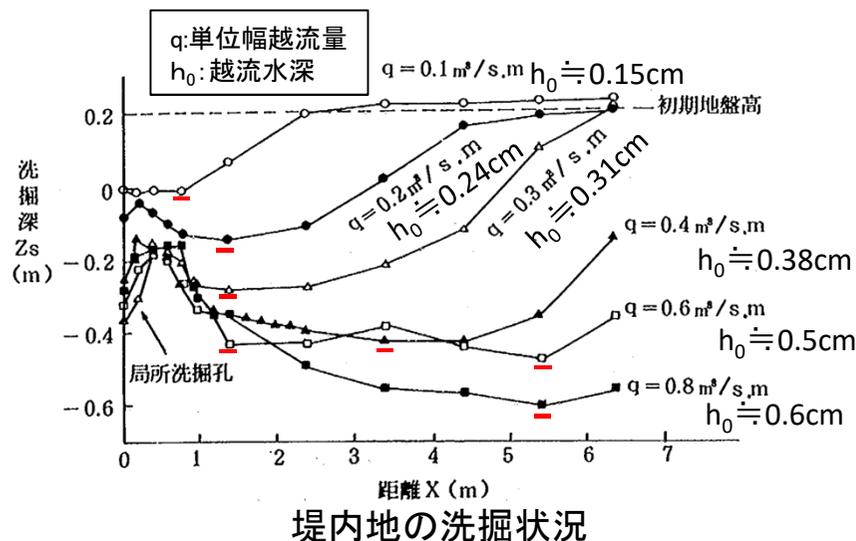
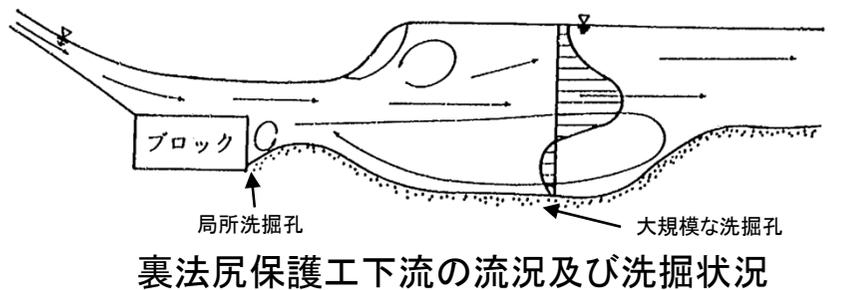


図 吸出防止シートと堤体表面の隙間高と隙間内の流速との関係

出典) 藤田光一, 末次忠司, 諏訪義雄, 東高德, 白戸正美, 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巻, pp.109-114, 2001.

裏法尻保護工(法留基礎工)周辺の洗掘深

- 法尻保護工(法留基礎工)周辺の洗掘形状については、基礎工天端によって法面を流下する越流水の向きを変えることで、基礎工近傍での洗掘深を小さくすることができる。最大洗掘深は、越流水深0.3mで0.3m程度、越流水深0.38mから0.5mで0.5mである。(左図)
- 法尻に30cmの平場を設けることで、越流水深40cm以下では法尻保護工周辺の洗掘深を30cm程度に低減することができる。なお、法尻部に平場を1.5m程度敷設できる場合には、その堤内地側では越流水深0.3m以下で平場の堤内地側の洗掘深はで0.2m程度となる。(右図)



左図の出典) 福岡捷二, 藤田光一, 加賀谷均: アーマー・レビーの設計, その1, 土木技術資料30-3, 1988.

右図の出典) 服部敦, 森啓年, 笹岡信吾: 越水による決壊までの時間を少しでも引き延ばす河川堤防天端・のり尻の構造上の工夫に関する検討, 国総研資料, 第911号, 2016.

裏法尻の基礎工際の洗掘深と最大洗掘深の発生位置

- 堤防陸側の洗掘の深さおよび範囲は、最大越流水深とともに大きくなる傾向が見られる。なお、最大越流水深10mのケースでは、水路床が露出した。このケースを除くと、越流水深が大きいほど、洗掘深が最大となる位置が堤防から離れている。
- 根留工(基礎工)際の洗掘深は、最大越流水深3 m 以下で根留工(基礎工)の厚さ1m以下にとどまり、変化も小さいのに対し、越流水深6 m 以上では根留工の厚さを上回り、最大越流水深の増大とともに大きくなる。
- 越流水深と洗掘深との関係について、前頁の結果も含めて記載すると、右図の通りである。

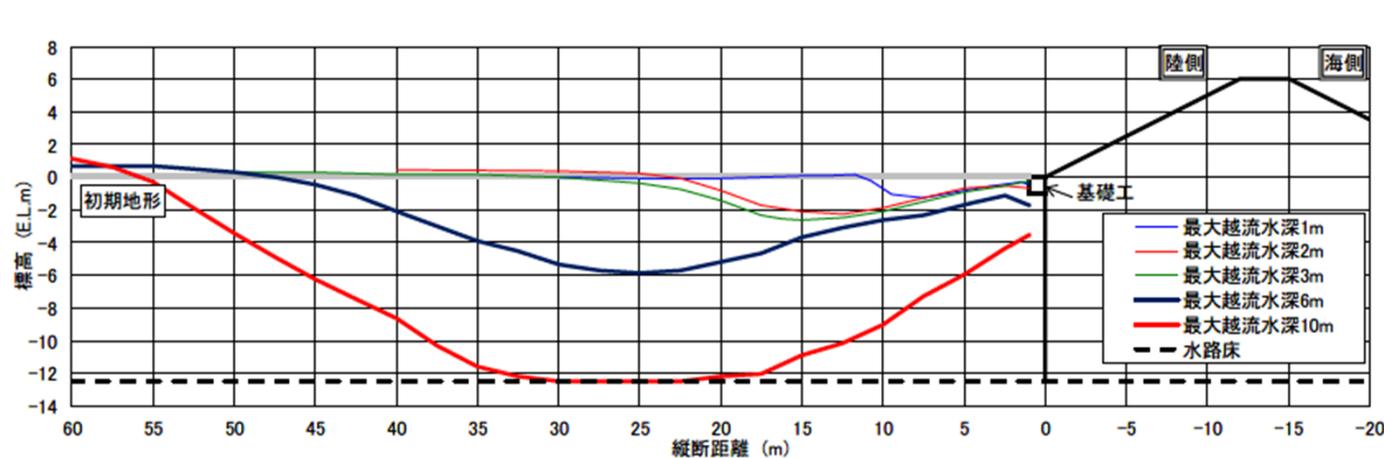


図 越流終了後の地形(比高6m、裏法勾配2割)

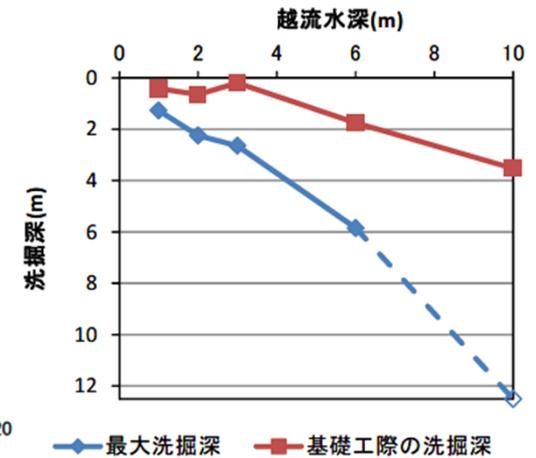


図 洗掘深と最大越流水深との関係(比高6m、裏法勾配2割)

出典) 諏訪義雄, 加藤史訓, 竹下哲也, 鳩貝聡, 姫野一樹: 津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点, 国総研資料, 第1035号, 2018.

越水時に生じる裏法部の水位と流速の変化

出典) 諏訪義雄, 加藤史訓, 竹下哲也, 鳩貝聡, 姫野一樹: 津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点, 国総研資料, 第1035号, 2018.

- 断面平均流速 q/h はどの越流水深(表法先での水位と天端高との差)でも流下方向に増加する傾向にある。
- 裏法尻(縦断距離0m)においては、越流水深2m 以上では10m/s 以上の高流速が生じている。
- 堤防の陸側の平坦面上ではさらに高流速となり、越流水深6m 以上では12m/s 以上となる。

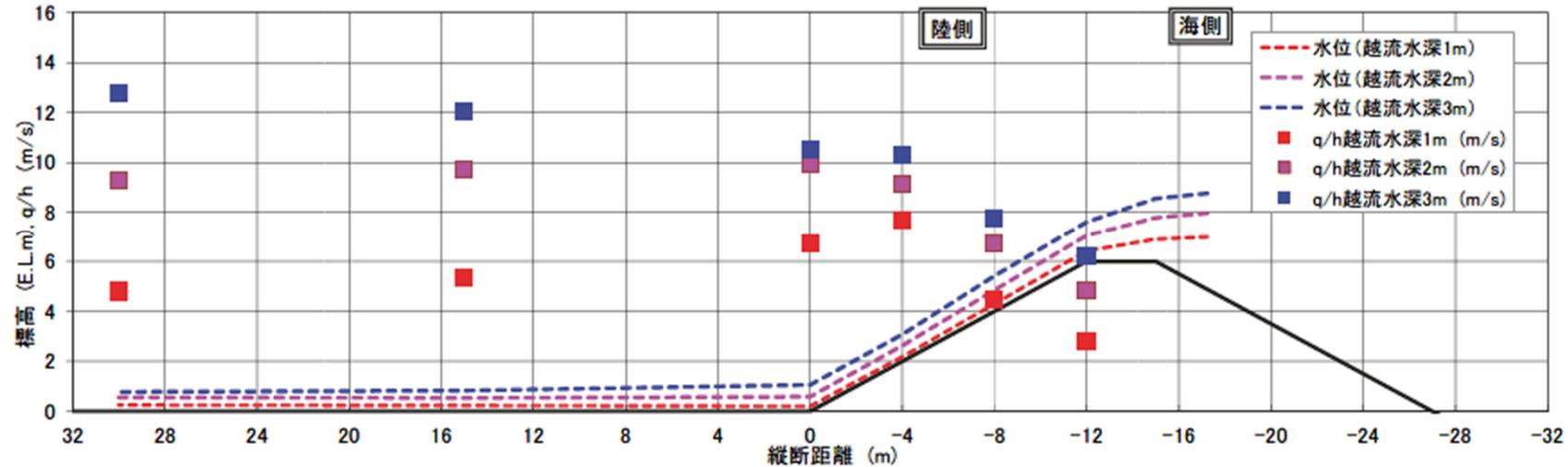


図 水位及びピエゾ水頭の分布(越流水深1m、2m、3m)

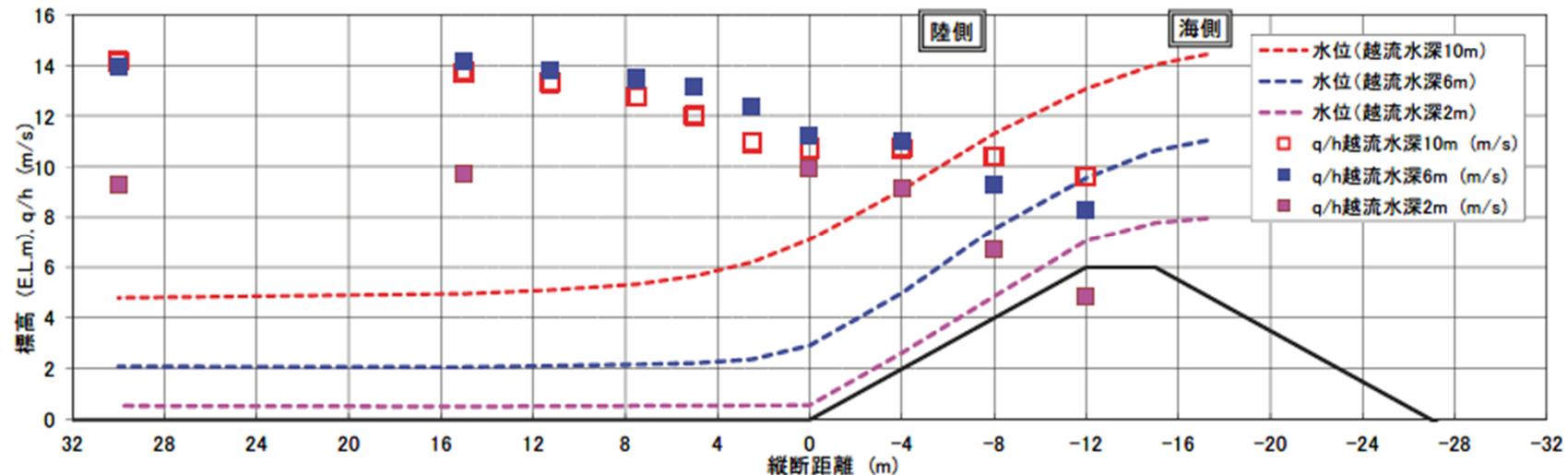


図 水位及びピエゾ水頭の分布(越流水深2m、6m、10m)

越水時に生じる裏法部の水位とピエゾ水頭の変化

出典) 諏訪義雄, 加藤史訓, 竹下哲也, 鳩貝聡, 姫野一樹: 津波越流に対する海岸堤防の粘り強い構造の要点, 国総研資料, 第1035号, 2018.

- ピエゾ水頭は裏法肩(縦断距離-12m)において水位を下回り、流水深6m以上では負圧になるほど低下している。
- 一方、裏法尻(縦断距離0m)においては、ピエゾ水頭は水位を大きく上回っており、越流水深が大きいほど広い範囲で圧力が上昇している。

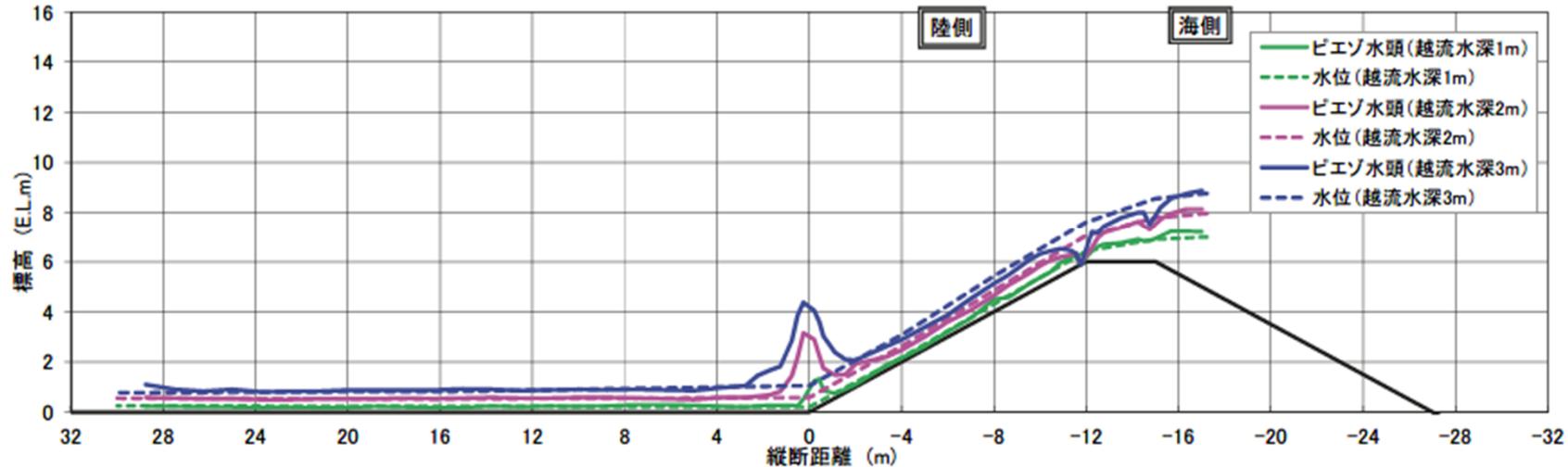


図 水位及びピエゾ水頭の分布(越流水深1m、2m、3m)

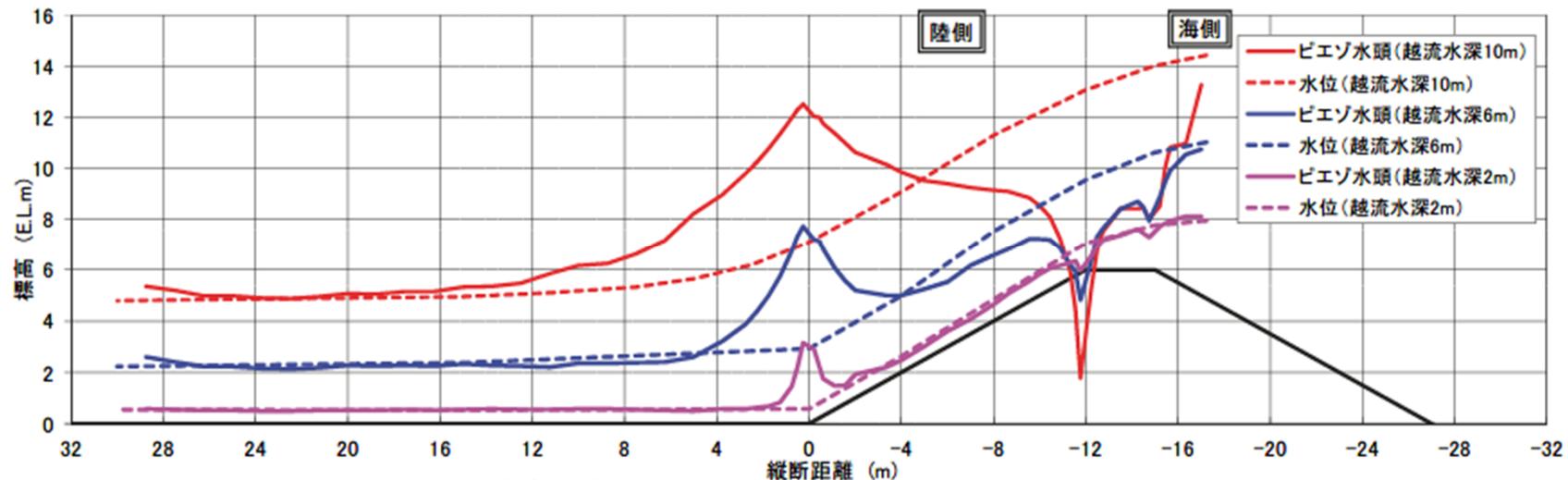


図 水位及びピエゾ水頭の分布(越流水深2m、6m、10m)

表面被覆型堤防の壊れ方(既往の知見と課題)まとめ

- 表面被覆型の構造については、越水に対する性能にバラツキがあるが、連節ブロックやかみ合わせブロックを表面被覆材として場合、ある程度の越水に対する性能を期待できる。
- 具体的には、越流水が表面被覆材に作用した場合でも、ただちに表面被覆材が剥離しないことが重要である。越水後の時間経過とともに、表面被覆材下の堤体土が侵食され、表面被覆材下の堤体の形状が変化することで表面被覆材表面にも不陸や陥没が発生する。
- 表面被覆材表面に不陸や陥没が発生すると、表面被覆材に作用する越流水の流体力が大きくなり、表面被覆材が剥離する。
- 表面被覆材が剥離し堤体土が露出すると、通常の堤防と同様に越流水によって侵食される。

- 大型堤防模型を用いた越水実験により、土堤を吸出防止シートで被覆することで、越流水深30cm、越流時間3時間でも裏法面の侵食が抑制されていることが確認されている。
- 吸出防止シートは一般的に厚さ1cm、透水係数0.01cm/s以上を利用することが河川工事の共通仕様書等で規程されているが、実験では厚さ1.02cm、透水係数0.186cm/sが利用されている。吸出防止シート表面を流れる越流水の影響が堤体土に及ぶことを避けるためには、吸出防止シートの透水係数を 10^{-1} cm/s程度以下とすることも必要と考えられる。
- また、吸出防止シートの堤体土の侵食抑制効果を発揮させるためには、シートと堤体土との隙間を1cm程度以下とすることが有効である。

- 越流水によって法尻周辺が洗掘され、法尻保護工が滑動もしくは転動すると、法尻付近から法面保護工が破壊される。そのため、法尻周辺の洗掘深を考慮して法尻保護工の平場の長さや根入れ深さを決定する必要がある。既往の実験を参考にすると、越流水深0.3mに対しては、法尻保護工(法留基礎工)の平場の長さが0.3m、根入れの深さは0.5mが必要とされる。