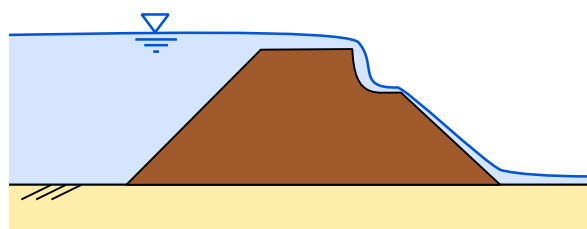


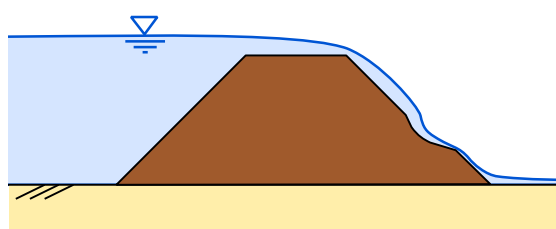
越水による河川堤防の侵食メカニズム

越水による河川堤防の壊れ方

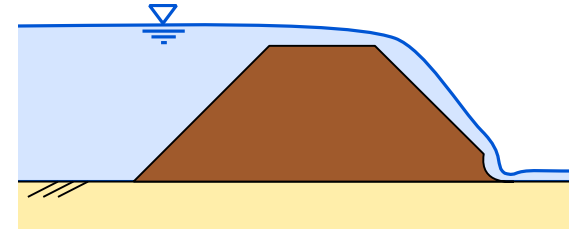
- 土堤の侵食過程は、川裏部から始まり、天端の崩壊へと進行する。
- 裏法の侵食の主要因は、流水による直接の侵食であり、堤体表面の耐侵食力によって、侵食が始まる位置が異なる(①~③)。
- 天端崩壊の主要因は、川裏部が侵食された後の堤体自身の不安定性による。



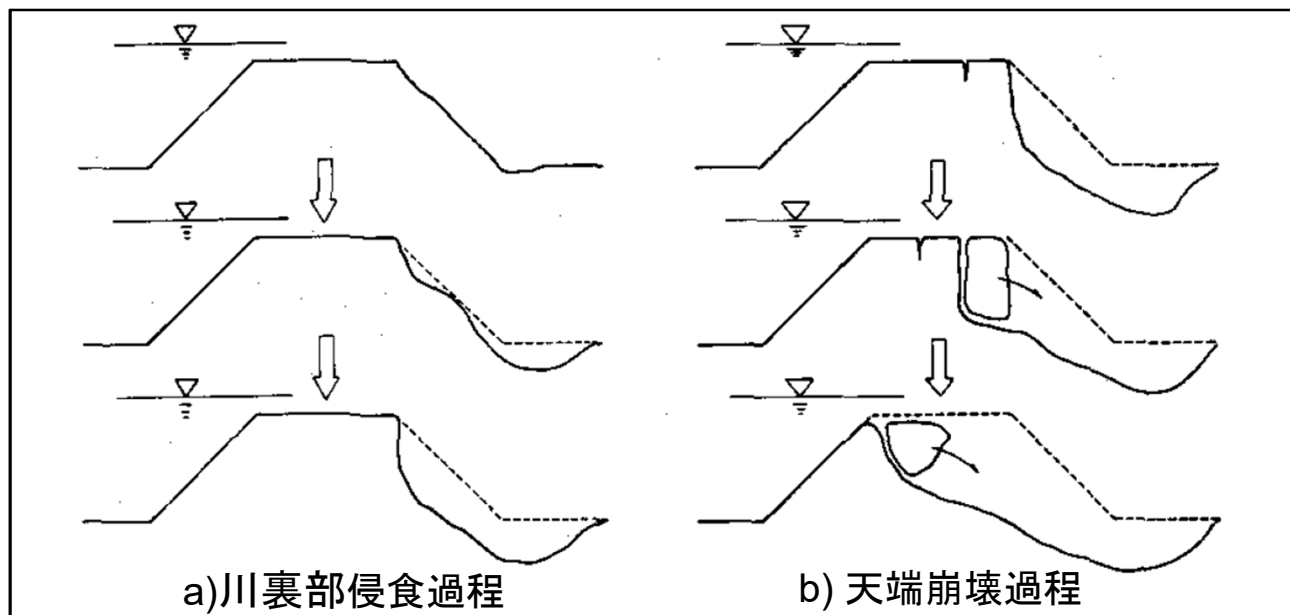
①法肩から進行



②法面から進行



③法尻から進行



a)川裏部侵食過程

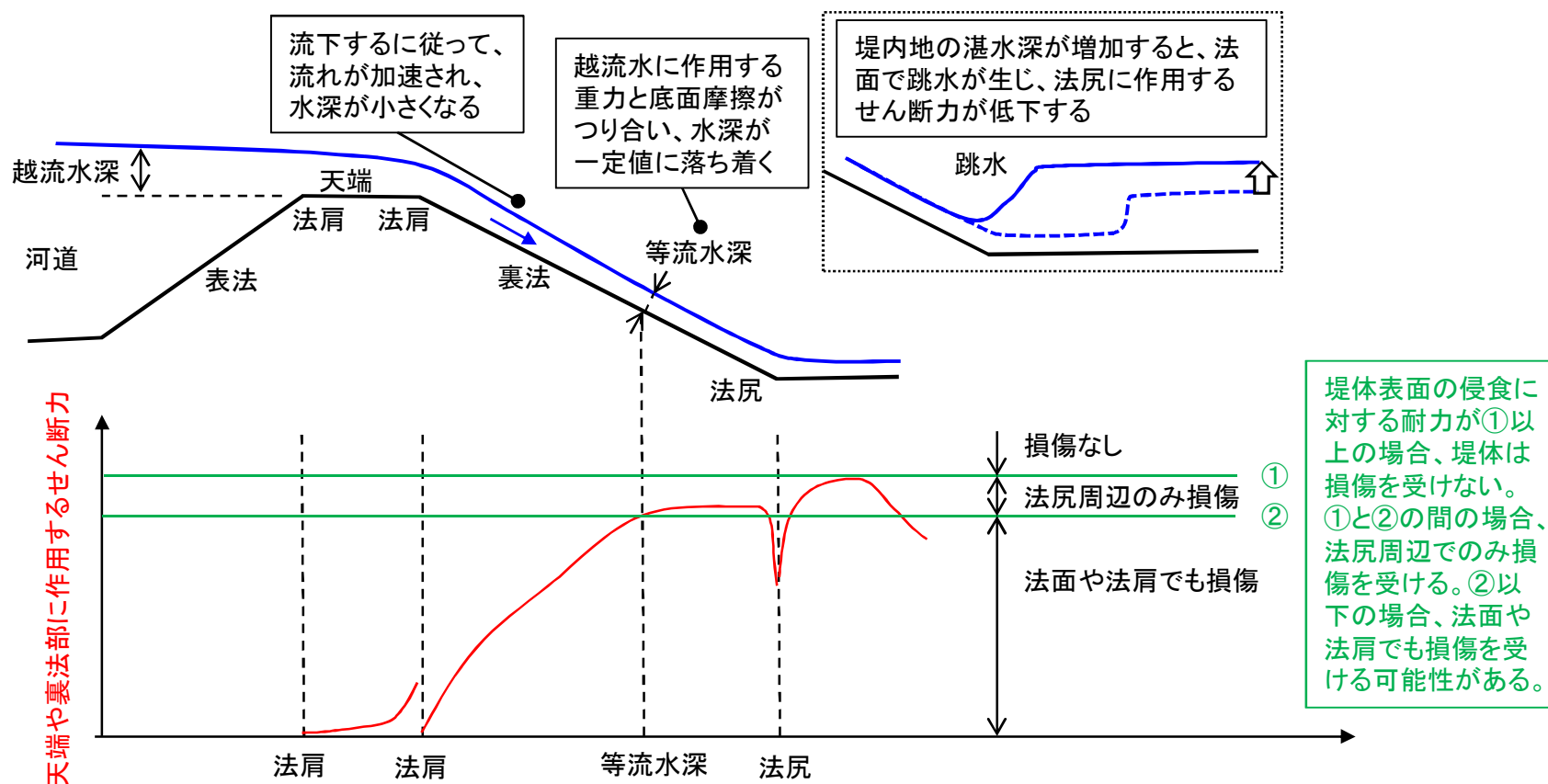
b)天端崩壊過程

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(既往の知見の整理)

- 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)。



越水による河川堤防の壊れ方の事例

- 現地で堤体土質を確認した際、法尻の損傷が顕著な事例ほど、堤体土質が粘性土を主体としており、堤体表層がよく締め固められている状況であることを確認している。

法尻の損傷が顕著な事例



那珂川水系那珂川19.5k

法面の損傷が顕著な事例



阿武隈川水系内川五福谷川合流点付近(遠景)



信濃川水系千曲川79.0k付近

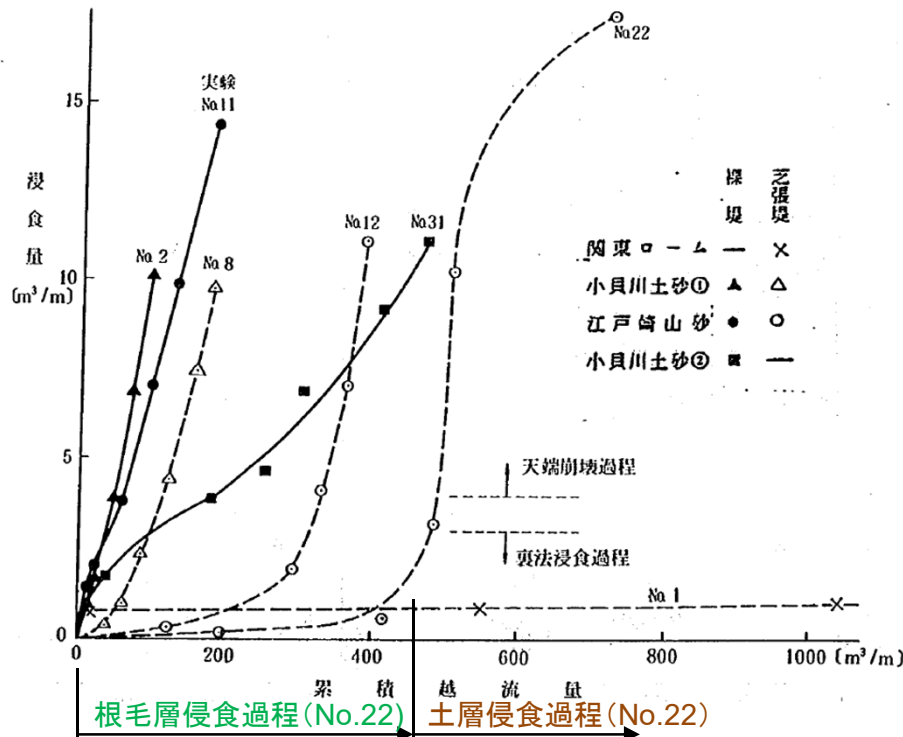


阿武隈川水系内川五福谷川合流点付近(近景)

堤防表面の侵食過程

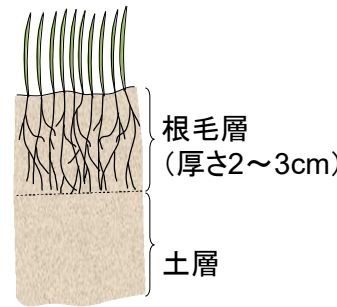
- 堤防法面及び法尻には、一般的に芝が植えられており、表層2~3cm程度の根毛層がある。
- 法面及び法尻の侵食過程は、根毛層の侵食段階(根毛層侵食過程)と土層の侵食段階(土層侵食過程)に分けることができる。
- 根毛層侵食過程については、平均根毛量(除草回数等の管理状態によって異なる)をパラメータとして、摩擦速度によって耐久時間を評価できる。
- 土層侵食過程については、土の引張り破壊応力から算出される侵食限界流速と法面に作用する流速とを比較することで侵食の進行の有無を評価できる。
- 堤防表面の耐侵食性を向上させることで、表面侵食を遅らせる効果が期待できる可能性がある。

※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。

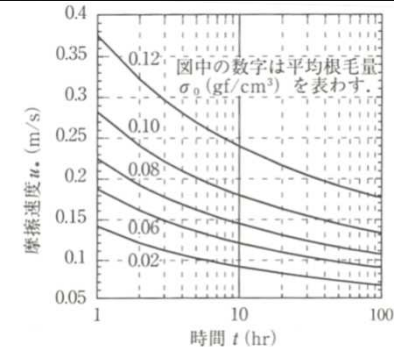


累積越流量と侵食量との関係※1)

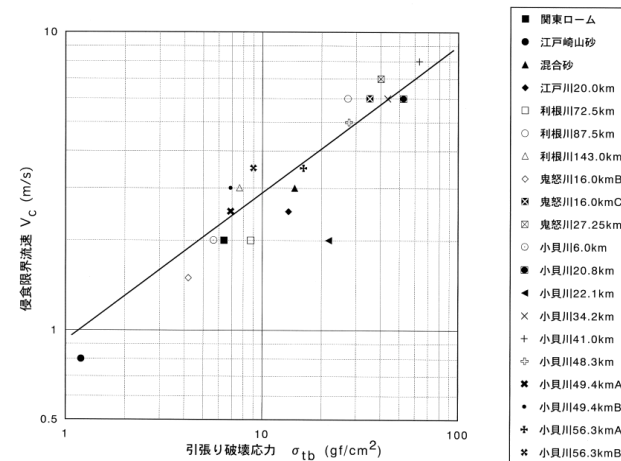
※1) 須賀堯三・橋本宏・石川忠晴・藤田光一・葛西敏彦・加藤善明: 越水堤防調査最終報告書一解説編一, 土木研究所資料, 第2074号, 1984.



根毛層のイメージ



摩擦速度と耐久時間の関係※2)



侵食限界流速と引張り破壊応力との関係※2)

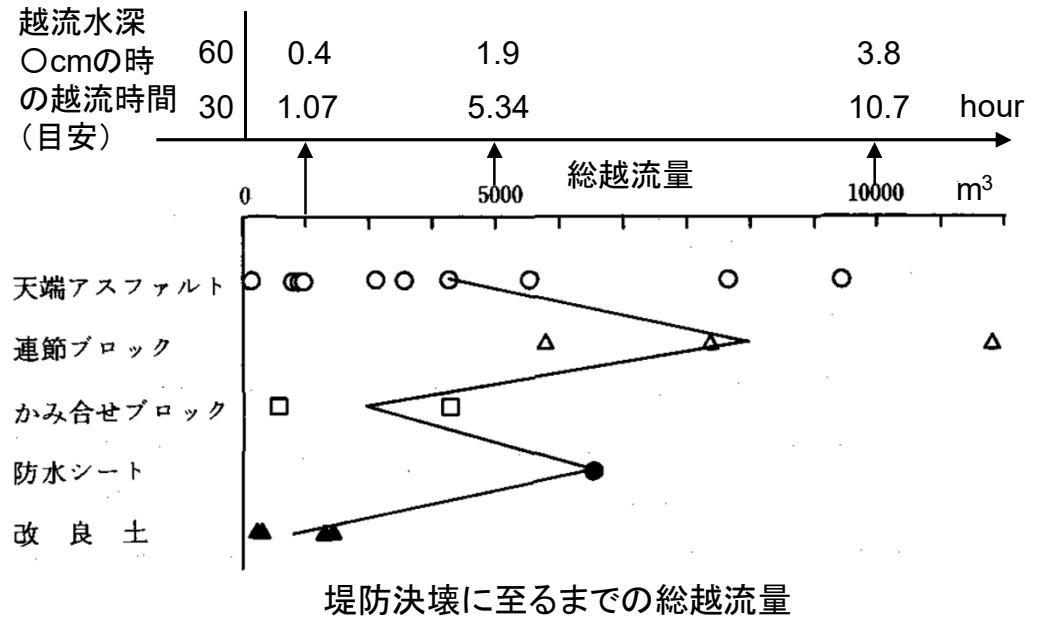
※2) 宇多高明・望月達也・藤田光一・平林柱・佐々木克也・服部敦・藤井政人・深谷沙・平館治: 洪水を受けた時の多自然川河岸防護工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料, 第3489号, 1997.

法面及び法尻保護工の工法別効果について

- 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、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>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。
- また、侵食抑制効果に加え、耐久性、設置コスト等を含めて、総合的に評価することの重要性が指摘されている。

堤防強化工法の概略

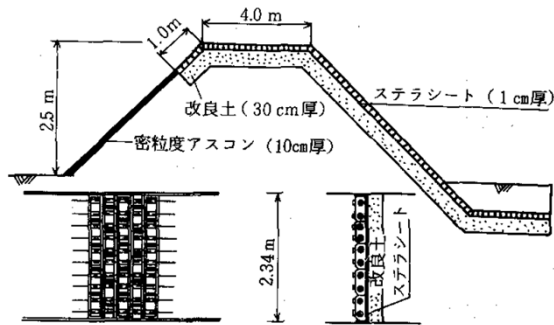
保護工	構造一般図	材料項目一般	摘要
天端アスフィルト (10 ケース)		{ 密粒度アスファルト 粗粒度アスファルト 砕石	遮水壁の設置, ロープの埋設の 効果の検討
連節ブロック (4 ケース)		460 200 { 吸出防止材 改良土	鉄線, ロープに よる連結, 改良 土を用いた場合 の検討
かみ合せブロック (2 ケース)		500 500 吸出防止材	かみ合せ効果 の検討
防水シート (2 ケース)		1 mm厚合成ゴム シート	シートの設置方 法の検討
改良土 (4 ケース)		砂質土: 消石灰 1 : 10 (重量比) 粘性土: アスファルト 乳剤 1 : 10 (重量比)	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



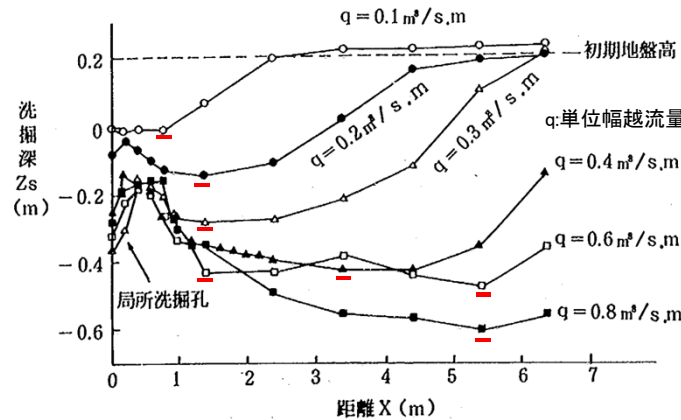
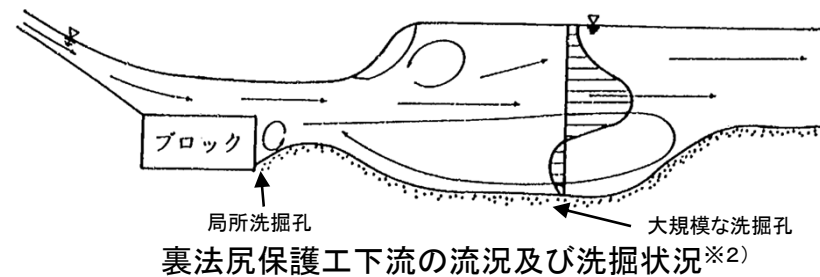
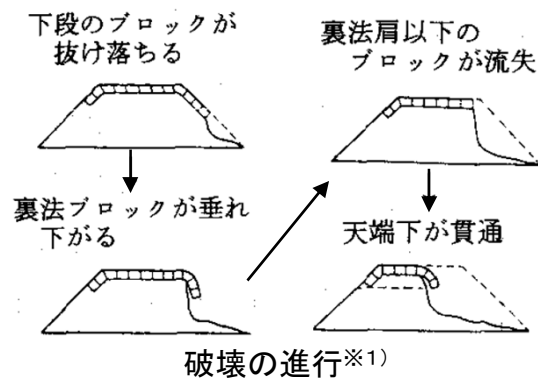
出典)加藤善明・橋本宏・藤田光一:堤防の耐越水化に関する実験的研究、
第29回水理講演会論文集、1985。

法尻補強の重要性について

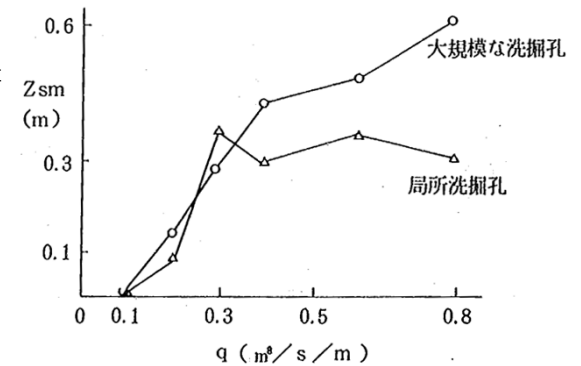
- 大型実験等により法面及び法尻の保護工について検討されてきたが、破壊の進行に見るように、法尻が破損した場合、法面へと破壊が伝播することから、越水時に最も大きなせん断力を受ける裏法尻の処理が重要である。
- そこで、アーマレビーの試験施工にあたっては、裏法尻周辺の洗掘を防止する裏法尻保護工について、大型堤防模型を用いた越流実験が実施された。
- 裏法尻下流では、高流速によって洗掘が生じる。また、最大洗掘深は、越流量の増加に伴って深くなるとともに、その発生位置は堤内地側へと移動する。
- 法尻保護工の設置にあたっては、保護工の基礎高を最大洗掘深よりも深くすること、もしくは保護工の天端によって流れの向きを変えて、最大洗掘深の発生位置を法尻から離す必要がある。したがって、堤内地の利用にも配慮する必要がある。



接続ブロックによる堤防保護工の構造図※1)



堤内地の洗掘状況※2)



堤内地の洗掘状況※2)

※1) 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。

※2) 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、1988。

現地での試験施工

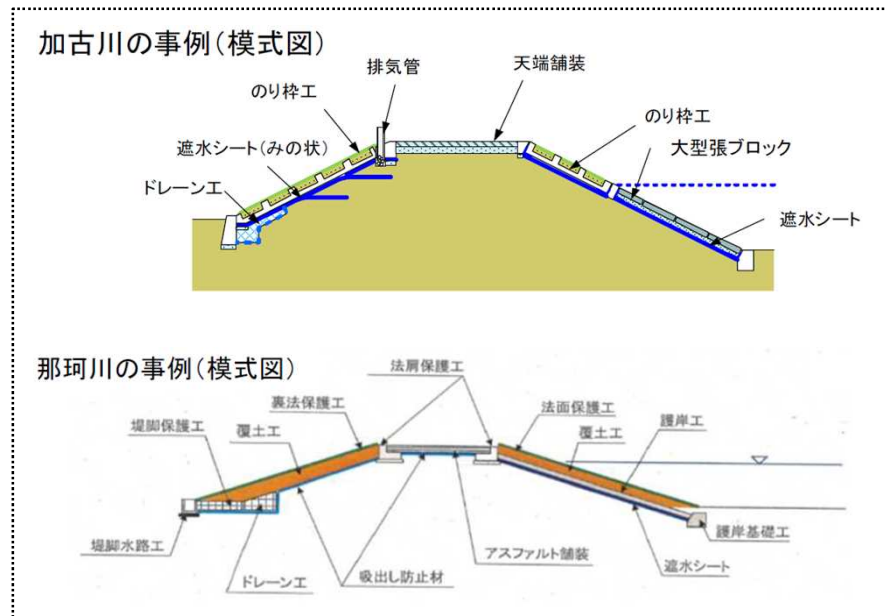
- 構造物の耐久性、維持管理の容易性等について確認するため、アーマーレビーやフロンティア堤防の試験施工を実施(第1回 資料2-1)。
- 加古川の試験施工箇所の現地調査を行った結果、法肩から数cm程度突き出た形で設置されていた排気管が折れていた。排気管は、直径10cm程度の円筒状の管であり、その管が法肩から遮水シートを突き抜けて堤体内部につながっており、雨水の進入を防止しつつ、空気を逃す構造となっていた。
- 東日本台風で越水が生じた那珂川の試験施工箇所の現地調査を行った結果、法尻付近の堤体表面が侵食され、吸出し防止シートが露出していた。シートに目立った劣化は見られないものの、繋ぎ目に開きが確認された。
- 耐久性、設置コスト等を含めて、総合的に評価することの重要性が指摘されてきたが、維持管理上の工夫、越流水への耐力を高めるための施工上の工夫などについて、引き続きモニタリングや改善のための検討を継続していく必要がある。



川裏法肩に設置された排気管の破損状況(加古川)



法尻の侵食に伴い露出した吸出し防止シートに見られる繋ぎ目の開き(那珂川)



(参考) 模式図

被災要因の分析について

- 第1回委員会において、堤体土質、堤体表面の植生、ウォータークッション、維持管理状態について分析が必要との意見をいただいたが、土質や形状等を十分に把握できていない箇所が多いため、文献1)、2)に示すように丁寧な分析を実施するためにも今後継続して調査を行う必要がある。

文献1) 渡邊国広・諏訪義雄・加藤史訓・藤田光一: 東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防の被災分析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.356-360, 2012.

文献2) 面屋謙太・杉井俊夫・宇野尚雄: ロジットモデルによる堤防被災要因の分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集61(3), pp.477-478, 2006.

- 次ページ以降では、直轄河川を対象として、ご指摘のあったいくつかの視点で分析を行った。

文献1)の分析例とまとめ

表-2 多重ロジスティック回帰分析の結果

説明変数 (mean±s.d.)	係数β	p値	標準化 回帰係数	オッズ比 (95%CI)
越流水深 (5.8±3.9m)	0.261	<0.001	1.013	1.30 (1.23-1.37)
裏法尻被覆幅 (1.6±3.1m)	-0.264	<0.001	-0.810	0.77 (0.68-0.85)
表法勾配1:n (1.7±1.3)	-0.328	0.004	-0.436	0.72 (0.57-0.90)
裏法勾配1:n (1.5±0.4)	-0.982	<0.001	-0.403	0.37 (0.23-0.61)
比高 (3.5±1.9m)	0.096	0.075	0.183	1.10 (0.99-1.22)
天端幅m (3.6±2.3m)	0.019	0.830	0.044	1.02 (0.84-1.18)

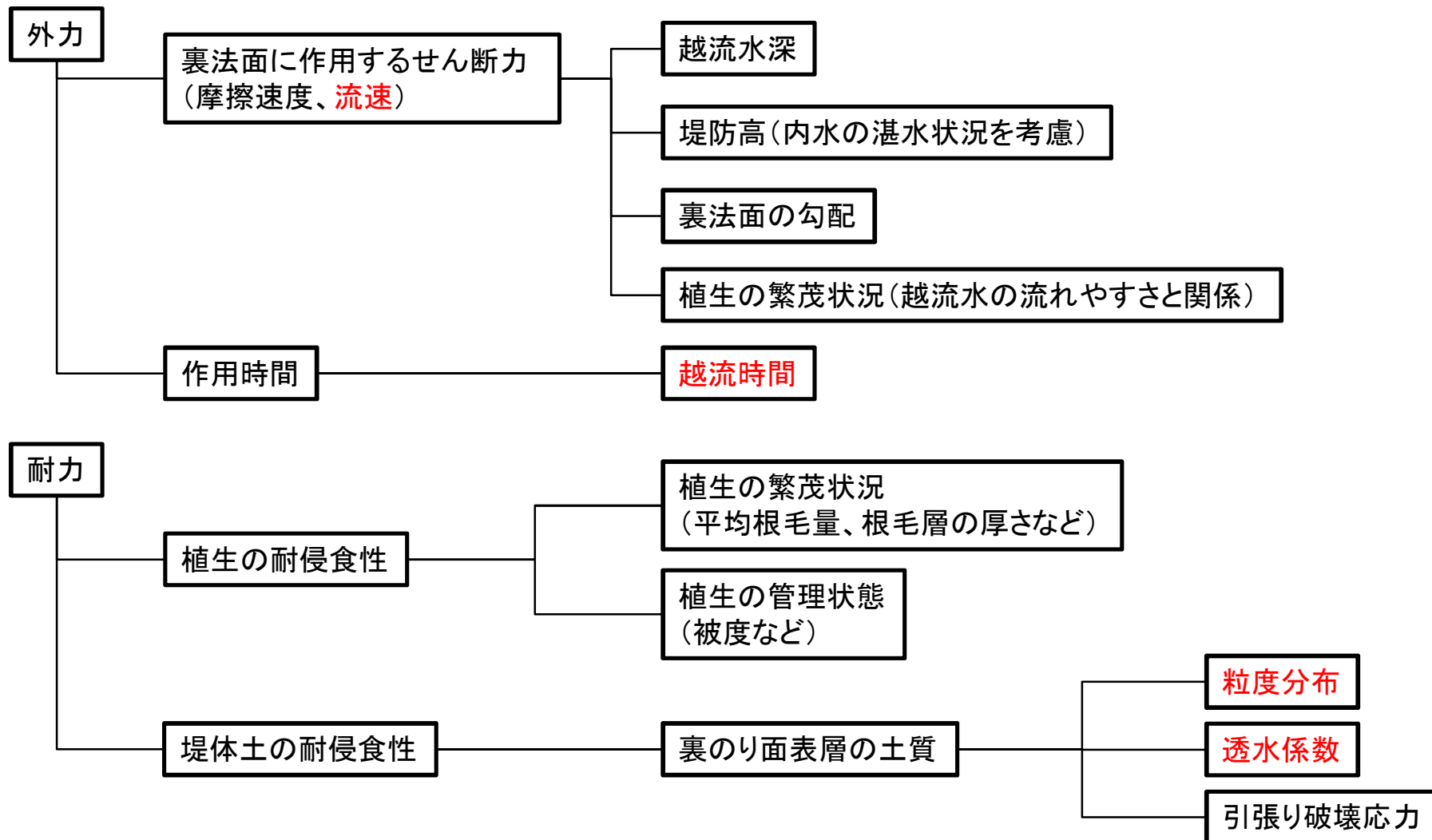
- 堤防の全壊に最も影響を与えたのは津波の越流水深であることが確認された。しかし両者の関係は海岸によるばらつきが非常に大きいので、防災上の議論にあたっては本研究で示した集計値だけでなく、同じ越流水深で最も被害が激しかった事例を包絡線等で把握しておくことも必要である。
- 裏法尻部の被覆、表法・裏法の緩勾配化が堤防の全壊確率を抑制することが示された。裏法尻被覆は最も影響が明瞭な構造要素であるので優先的に扱うことが望まれるが、表法勾配と裏法勾配については全壊と半壊で傾向が逆転するので慎重に扱う必要がある。
- 比高が高くなると全壊確率が高い傾向が2群比較で見られたが、多変量解析では統計的に有意でなかった。

文献2)の分析例 (破堤要因の分析に用いた 堤防の特性と分析結果の一例)

回数	1	2	3	4	5	6	7	回数		
要因	t値	t値	t値	t値	t値	t値	t値	要因	パラメタ の符号	パラメタ の一致
定数項	0.58	0.47	0.94	0.35	0.84	0.05	1.65	定数項		
天端幅	1.48	1.57	1.58	1.56	1.81	1.86	1.40	天端幅	負	○
表法高	0.31							表法高	正	○
表法面勾配	1.07	1.29	1.29	1.01	1.17			表法面勾配	正	○
裏法面勾配	0.95	1.02	1.69	1.62	1.59	1.57		裏法面勾配	負	×
堤体断面積	0.58	0.52						堤体断面積	正	×
流量比	1.23	1.36	1.50	1.53	1.77	1.90	1.74	流量比	正	○
c/γH	0.80	0.92	1.04					c/γH	負	○
砂	1.09	0.18	1.25	0.95				砂	負	
舗装の種類	1.20	1.36	1.57	1.50	1.66	1.73	1.44	舗装の種類		○
的中率	82.14	82.14	85.71	85.71	78.57	89.29	71.43	的中率		
尤度比	0.5184	0.5413	0.5118	0.5697	0.5337	0.5576	0.4452	尤度比		

被災要因の分析(試行)

- 既往の知見を参考にして、法面侵食過程の外力と耐力を以下の通り整理した。

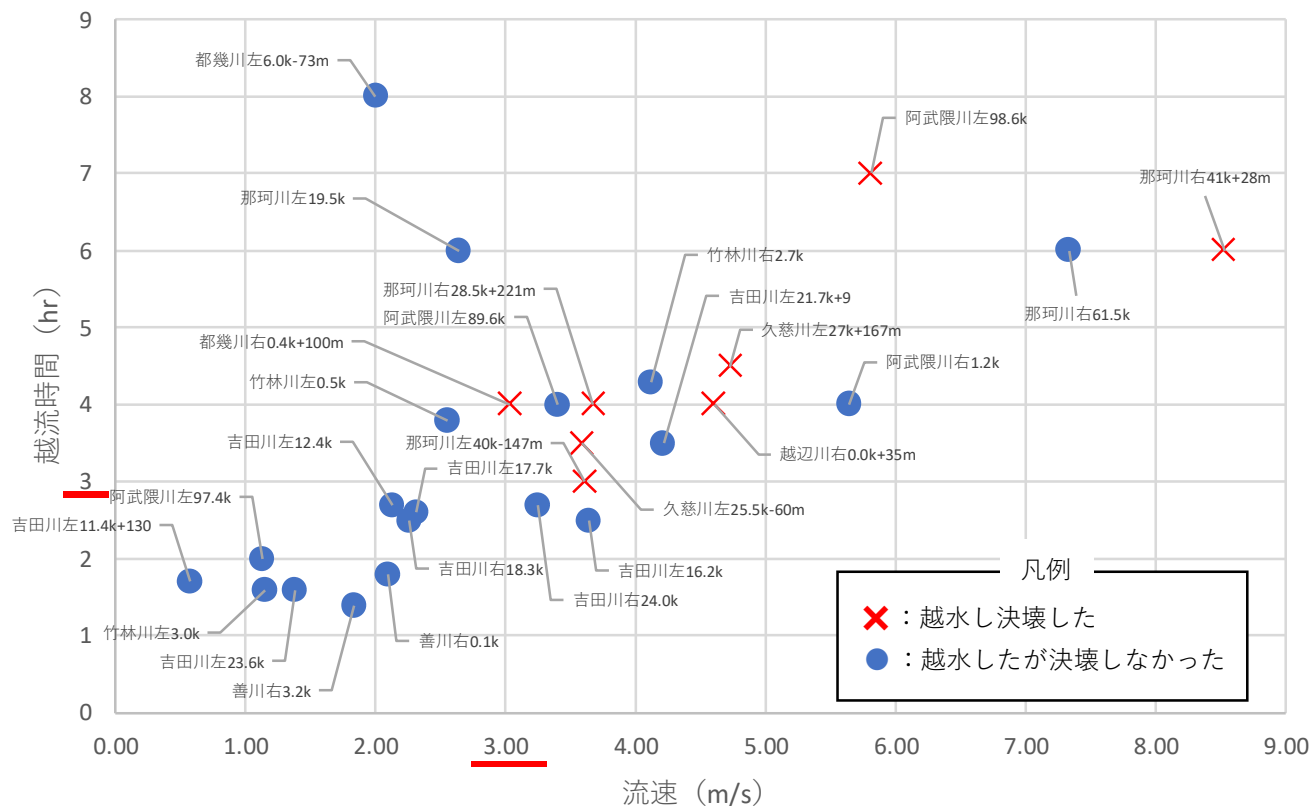


※ 以下では、赤字を対象として分析

など

「流速」、「作用時間」と被災状況との関係

- 越水による外力と決壊の関係を見るために、越水により決壊した箇所と決壊しなかった箇所における越流時間と流速(等流流速)の関係を整理。
- 法尻付近での流速(裏法部の等流流速)が3m/s未満の箇所で今回決壊している箇所はない。
- また、越流時間が3時間未満の箇所で今回決壊している箇所はない。
- 既往の知見※) によると、「流速2m/sを目安として、芝の耐侵食性は確保されている」とされている。
- 一方、今回の洪水では、法尻付近の流速が3m/s未満であれば堤防裏法面および法尻表面の耐侵食性は一定程度、確保されているものと考えられることができる。



※) 福岡捷二・藤田光一・加藤善明・森田克史: 堤防法面の芝の耐侵食特性, 土木技術資料29-12, 1987.

裏法面土質と決壊の関係

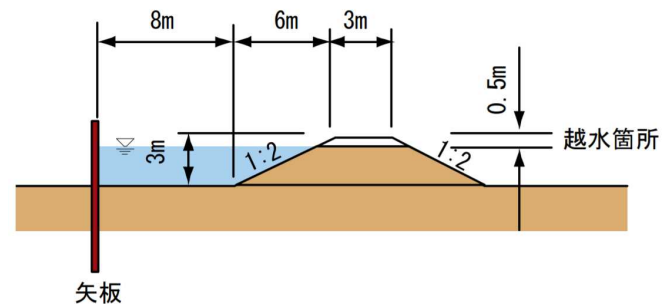
- 土質と決壊に関する研究事例は少ないが、千代田実験水路の成果※として、細粒土の堤防は砂礫の堤防と比較して、越水開始から決壊までの経過時間が長く、土質によって決壊幅が拡大していく過程が異なることが示されている。

【千代田実験水路の越水破堤実験】

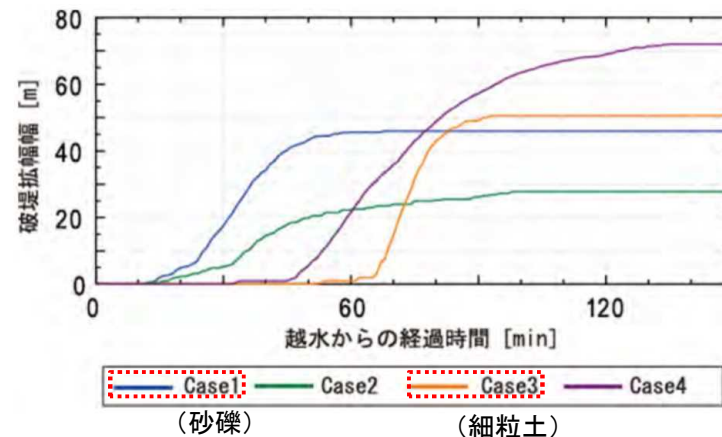
平成20年～平成24年に北海道開発局と寒地土木研究所の共同で、高さ3m、天端幅3m、法面勾配1:2の裸堤（芝を張らない土堤）に対して、越水破堤実験が実施されている。

砂礫の堤防（Case1）：越水開始後15分程度で決壊幅が拡大し始め、その後35分程度で決壊幅が45mに達した

細粒土の堤防（Case3）：越水開始後60分程度で決壊幅が拡大し始め、その後25分程度で決壊幅が50mに達した



ケース	流量	堤体土質	堤体天端幅
Case1	70m ³ /s	砂礫	3m
Case2	35m ³ /s	砂礫	3m
Case3	70m ³ /s	細粒分	3m
Case4	70m ³ /s	砂礫	6m



※ 北海道開発局、寒地土木研究所：河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書概要版（平成24年10月）

裏法面土質と決壊の関係

- 裏法面土質と決壊との関係を検討するにあたっては、
 - ① 同程度の外力を受けた箇所でもグルーピングして、土質区分等を比較する方法
 - ② 裏法面に作用する流速(外力)と、堤体土の耐侵食性を土の侵食限界流速(せん断耐力等)を用いて比較する方法
 - ③ 裏法尻に作用する流速(外力)と、堤体土の耐侵食性を土の物性(今回は土の物性を代表するものとして透水係数を採用)を用いて比較する方法等が考えられる。

①同程度の外力を受けた箇所について土質区分を比較して決壊、未決壊の違いを分析する方法

②外力とせん断耐力を直接比較して評価する方法



- 裏法面土質のせん断耐力を評価するには、法面に作用する流速と引張り破壊試験によって求まる侵食限界流速を比較する。
- 今回の洪水の越水箇所については、引張り破壊試験は実施されていない。今回の越水箇所の耐侵食性を評価するには、越水箇所等における引張り破壊試験等を行う必要がある。

③外力と間接的に評価した土の強さを比較する方法

※土質により耐侵食性(堤防の耐力)が異なるとの仮定の基、土質を代表する指標として透水係数を採用。

室内透水試験結果を用いる方法



- 今回の洪水の越水箇所では堤体土の室内透水試験は実施されていない。
- 堤防詳細点検時に近傍で室内透水試験が実施されている箇所が一部あるため決壊との関係について整理を行った。

Creagerの推定式の透水係数を用いる方法



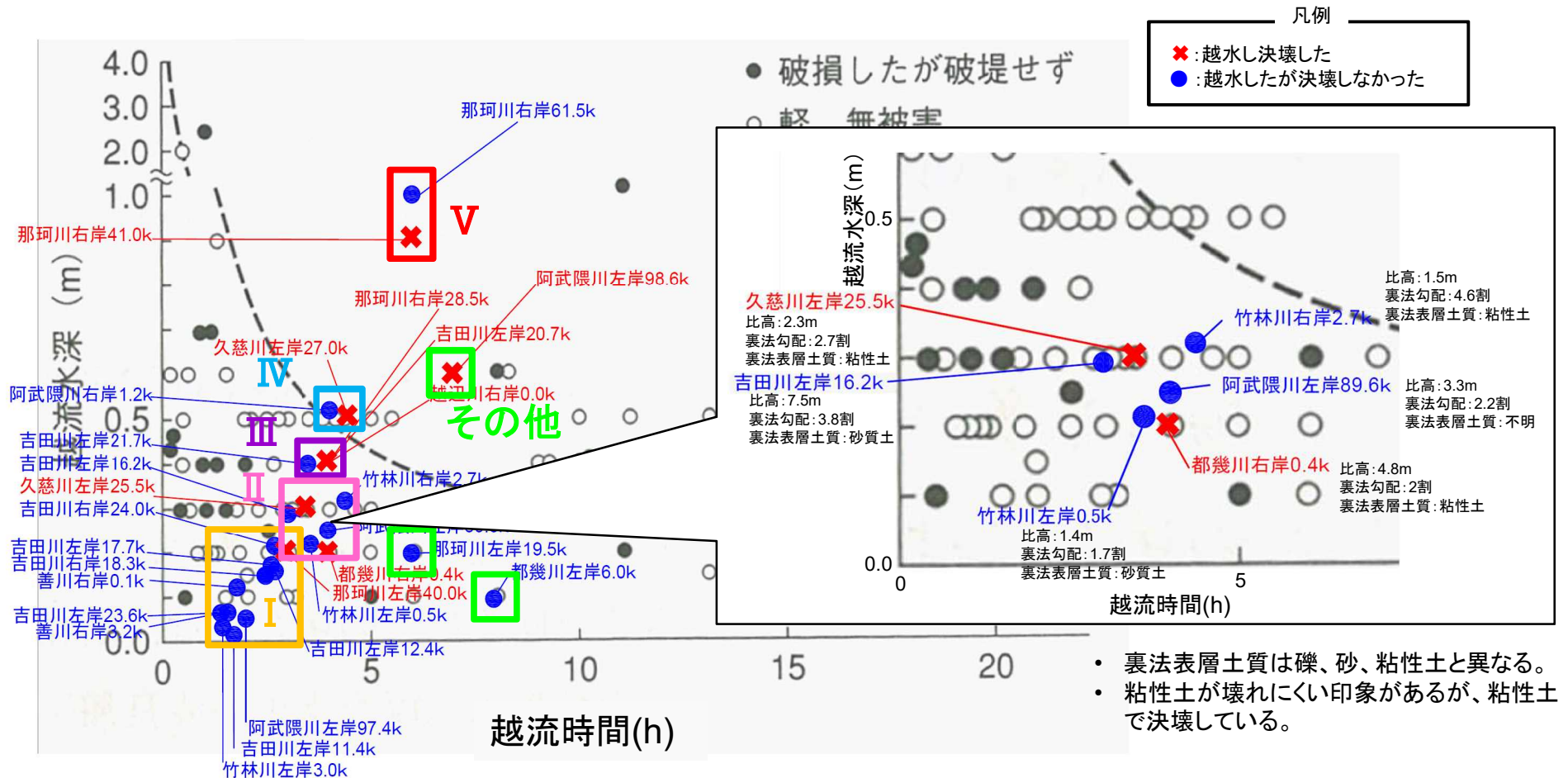
- 今回の洪水の決壊箇所では粒度試験が実施されているため、粒度分布を基にCreagerの推定式による透水係数を用いた。
- 未決壊箇所については堤防詳細点検の粒度試験結果を用いた。
- 推定した透水係数と裏法尻の等流流速を用いて決壊の有無について整理を行った。

について次頁以降に整理した結果を示す。

①土質や形状と決壊の有無に関する分析例

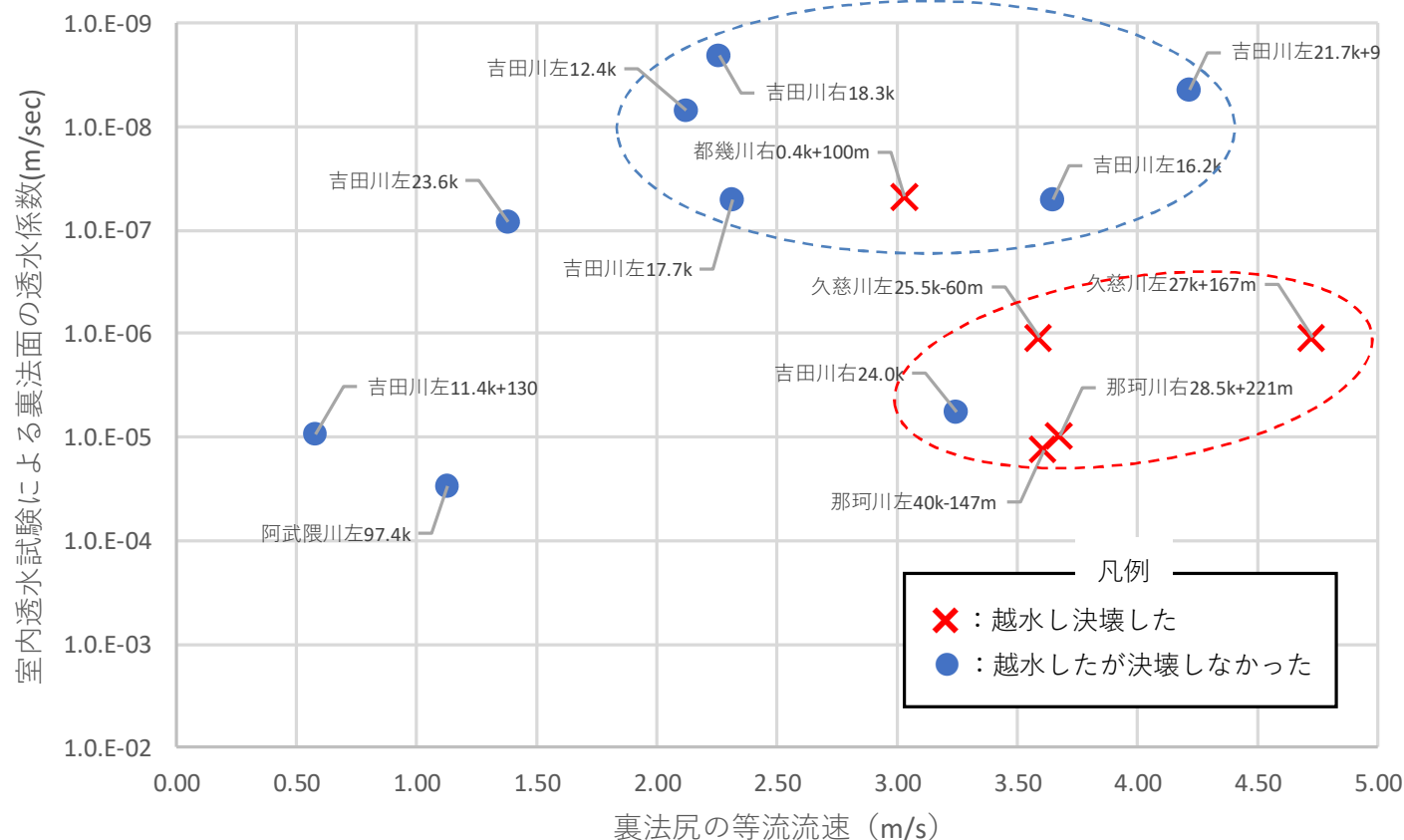
- 外力(越流水深と越流時間)がほぼ同程度の箇所を分類し、堤体土の土質区分や堤防の形状(裏のり面勾配等)、比高差をパラメータとして、決壊の有無に影響を与えたと考えられる項目を分析したが、明確な傾向を見出すことはできなかった。

例: エリアII 外力がやや小さい場合



③-1 裏法面土質と決壊の分析例(室内透水試験結果を用いた例)

- 越水箇所近傍において、過去に裏法面の土質の室内透水試験を実施している箇所については、この裏法表層の透水係数と等流流速を用いて、決壊の有無を整理した。
- 既往成果^{※)}では、細粒土を主体とした堤防は決壊開始までの時間が長い。今回の洪水でも、透水係数が小さい箇所では決壊が少なく、透水係数が高い箇所では決壊が多い傾向が見られる。
- 今後は、決壊箇所及び越水未決壊箇所について裏法面表層の室内透水試験を実施する等、土質調査を継続的にを行い、データの充実を図る必要がある。



※) 北海道開発局、寒地土木研究所: 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅機構に関する実験報告書(平成24年10月)

③-2 裏法面土質と決壊の関係分析例 (Creagerの推定値を用いた例)

- 決壊箇所については粒度試験が実施されているため、今回の検討ではCreagerの推定式による透水係数を裏法面土質の代表として用いた。
- 未決壊箇所については粒度試験が実施されていないため、近傍の堤防詳細点検の粒度試験結果を用いた。

Creagerの透水係数の推定方法

(1) 堤体裏法面の粒度特性の整理

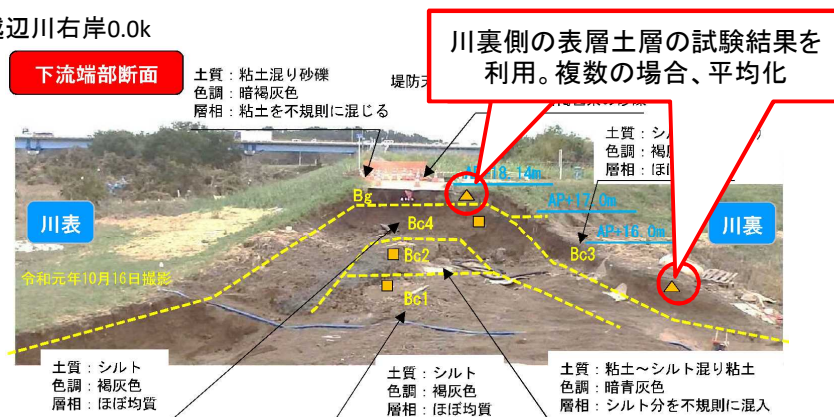
【越水により決壊した箇所】

決壊箇所については、決壊箇所断面で採取した土質について粒度試験にかけた結果を整理した。

【越水したが決壊しなかった箇所】

決壊しなかった箇所については、近傍の詳細点検結果のうち、堤体の川裏表層付近の粒度試験結果を整理した。

例：越辺川右岸0.0k



(2) 堤体裏法面の透水係数の推定

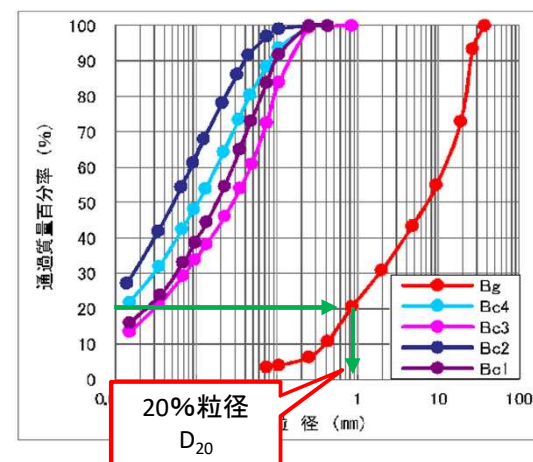
【粒度試験結果から透水係数の推定】

粒度試験結果より得られる20%粒径 D_{20} を基に、Creagerの透水係数推定式より透水係数を推定する。

$$k=0.359D_{20}^{2.327}$$

k: 透水係数(cm/sec)

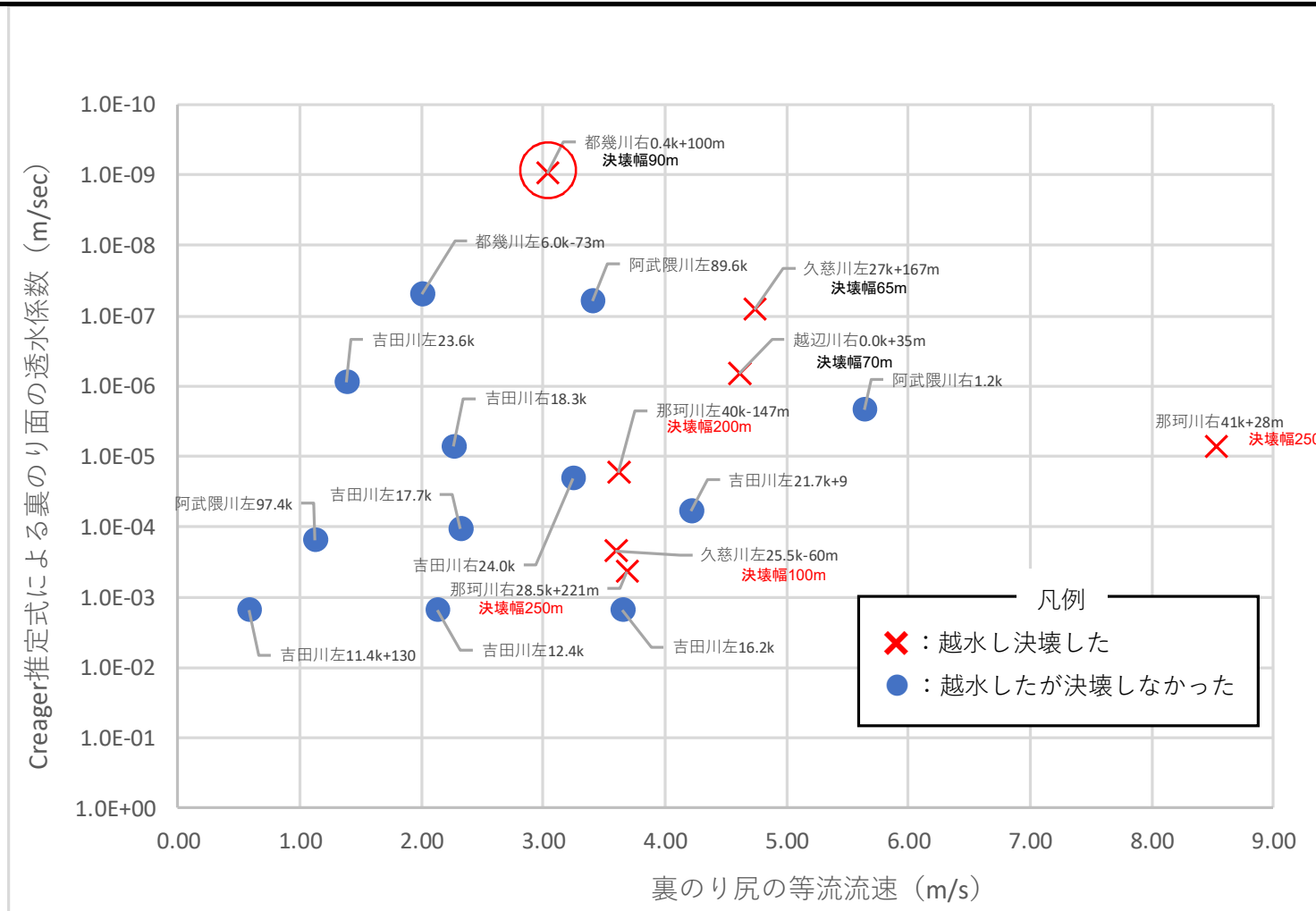
D_{20} : 粒径加積曲線の20%粒径(mm)



堤体裏法土質の透水係数が複数得られる場合は相加平均し、当該地の裏法面土質の代表透水係数とした。

③-2 裏法面土質と決壊の分析例 (Creagerの推定値を用いた例)

- 今回の洪水では、透水係数が小さい箇所の決壊は少なく、透水係数が大きい箇所の決壊が多い傾向がみられるが、室内透水試験結果を用いた整理と比べると、バラつきは大きい。
- 参考に、決壊箇所については決壊幅も併せて整理を行った。
- 堤体の越流水への耐力と決壊幅にも関係があると考えられるため、決壊地点で決壊幅が異なる要因についても、今後分析が必要である。



◆越水による河川堤防の侵食メカニズムに関して、既往の知見を以下のように整理した。

- 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。
- 上記を踏まえると、越流水への耐力を向上させるためには、まず第一に法尻保護が重要である。また、作用するせん断力が裏法面の土質や植生の侵食に対する耐力を上回る場合には法面を補強することが考えられる。天端保護は、法面侵食後の天端崩壊を遅らせることを期待するものである。
- 一方、法面保護にあたっては、法尻保護工が重要である。法尻保護工の設置にあたっては、保護工の基礎高を最大洗掘深よりも深くすること、もしくは保護工の天端によって流れの向きを変えて、最大洗掘深の発生位置を法尻から離す必要がある。したがって、堤内地の利用にも配慮する必要がある。

◆堤体土質、堤体形状、堤内地の湛水状況、植生の繁茂状況等が被災の程度に与えた度合いについて

- 決壊箇所近傍はもとより、越水しても決壊しなかった箇所の現地の情報を収集するとともに、模型実験等も組み合わせて、その要因について継続的に調査・分析を進める必要がある。
- 堤防の形状の他に、堤防の耐力として、堤防の締固め度や土質、透水係数、粘着力等の種々のパラメータが決壊のしにくさに及ぼす影響について、今後検討を行う必要がある。

◆浸透が越水にどのような影響を与えるかについて

- 越水時の堤体への浸透状況、その時の堤体のせん断力、またその際の侵食に対する耐力の変化などについて、今後検討の必要がある。