

河川堤防の洪水時の破堤特性、性能評価および対策
ー 災害事例から学び今後を展望 ー

常田賢一

(一社) 地域国土強靱化研究所 顧問、大阪大学 名誉教授

概 要

近年の豪雨などにより発生した河川堤防の破堤の 6 事例：2004 年 10 月台風 23 号／円山川、2004 年 10 月台風 23 号／出石川、2012 年 7 月九州北部豪雨／矢部川、2015 年 9 月関東・東北豪雨／鬼怒川、2019 年 10 月台風 19 号／吉田川、2019 年 10 月台風 19 号／千曲川を対象として、それぞれの堤防調査委員会における審議、報告の内容について、“性能評価”の共通の視点により、破堤特性および復旧工法を横断的に整理するとともに、今後の河川堤防の破堤に関わる性能評価のための評価指標、評価基準などを考察している。

目 次

はじめに	2
1. 破堤特性に関する既往事例の整理	3
事例 1：円山川・越流破堤	3
事例 2：出石川・越流破堤	4
事例 3：矢部川・基礎地盤パイピング破堤	7
事例 4：鬼怒川・越流破堤	10
事例 5：吉田川・越流破堤	13
事例 6：千曲川・越流破堤	17
2. 堤防の破堤に関する性能評価に関する考察	20
2.1 破堤事例の総括	20
2.2 既往の越流事例との比較における考察	21
2.3 堤防の性能評価の視点に応じた評価指標と評価基準	24
3. 危機管理型ハード対策を上回る効果を有する粘り強い河川堤防への動き	26
3.1 堤防の越水に対する性能の付加	26
3.2 粘り強い河川堤防の実際：嘉瀬川のパイロット事業	32
4. 今後、必要な取組み課題	37
4.1 落堀の形成と抑制	37
4.2 破堤拡大の特性と抑制	42
4.3 破堤および破堤拡大の対策	44
4.3.1 アーマーレビーによる難破堤型堤防	45
4.3.2 粘り強い堤防構造への展開	45
4.4 流域治水：全体最適に資する堤防の個別最適の深化	49
まとめ	51

はじめに

近年、豪雨、台風などによる洪水被害が多頻度化、激甚化している。特に、河川堤防の破堤による浸水被害が顕著であり、2015 年関東・東北豪雨による鬼怒川での越流破堤を契機とした“粘り強い”堤防の整備、2022 年度からの“流域治水”の推進などの事業が積極的に図られている。

さて、洪水時の堤防の破堤の要因は、鬼怒川堤防調査委員会の報告書（平成 28 年 3 月）¹⁾などによると、図 1 の 4 形態に大別される。従来から越流による破堤が多いとされてきているが、近年、発生した下記の破堤事例でも、6 事例中、5 事例が越流破堤である。

事例 1：2004 年 10 月台風 23 号	円山川 豊岡市立野地区	*越流破堤
事例 2：2004 年 10 月台風 23 号	出石川 出石町鳥居地区	*越流破堤
事例 3：2012 年 7 月九州北部豪雨	矢部川 みやま市津留地区	*基礎地盤・パイピング破堤
事例 4：2015 年 9 月関東・東北豪雨	鬼怒川 常総市三坂地区	*越流破堤
事例 5：2019 年 10 月台風 19 号	吉田川 大郷町粕川地区	*越流破堤
事例 6：2019 年 10 月台風 19 号	千曲川 長野市穂保地区	*越流破堤

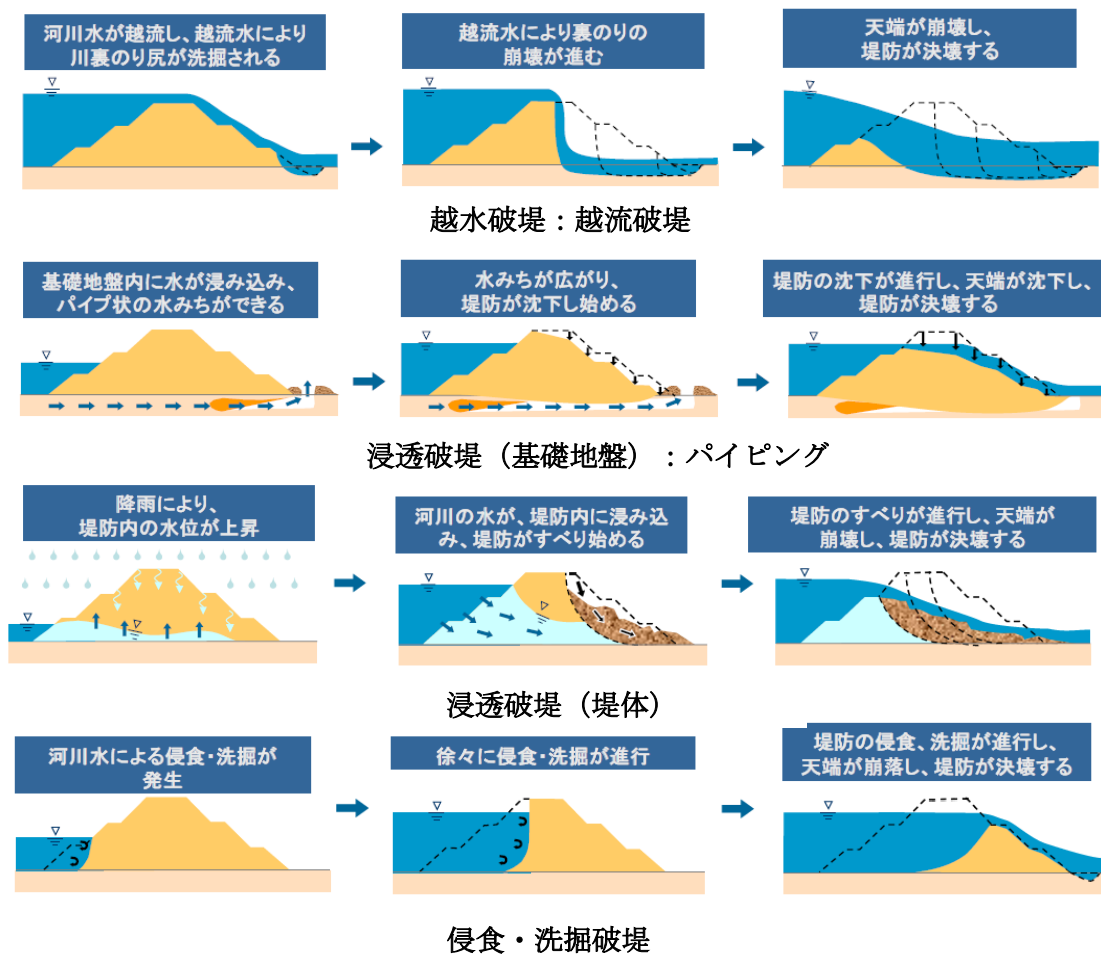


図 1 堤防の破堤の形態 ¹⁾

堤防の破堤に対する合理的、効果的な対応には、堤防の性能を明確にし、その性能評価が有効であるが、性能評価の実務に関する課題は多く、今後の取り組みが必要とされているのが現状である。

そのため、本文は、災害や河川ごとに個別に実施されている上記の 6 事例の堤防調査委員会における審議、報告の内容について、“性能評価”の共通の視点により、破堤特性および復旧工法を横断的に整理するとともに、今後の河川堤防の破堤に関わる性能評価のための評価指標、評価基準などを考察する。

参考文献

1) 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会 報告書、平成 28 年 3 月。

1. 破堤特性に関する既往事例の整理

本章では、前述の事例 1～事例 6 に関する堤防調査委員会の報告および著者の現地調査などに基づいて、性能評価の視点から洪水時の堤防の破堤特性に関して、事例分析（Case Study）、整理を行う。

事例 1：円山川・越流破堤

2004 年（平成 16 年）10 月の台風 23 号では、国土交通省管理区間の円山川の 14 区間 3,030m、出石川の 11 区間 4,340m で越水し、そのうち 2 箇所の堤防で破堤し、浸水被害が発生した。同災害を受けて、国土交通省は円山川堤防調査委員会²⁾により被害原因、対策などの調査を実施し、平成 17 年 3 月 30 日に「円山川堤防調査委員会 報告書」³⁾を出している。同調査の主たる箇所は、越水破堤した、豊岡市立野地区の円山川右岸（13.2k）、出石町鳥居地区の出石川左岸（5.5k）であるが、本文では、それぞれを事例 1 および事例 2 として、調査委員会の資料、報告書に基づいて整理する。

円山川右岸（13.2k）では、**写真 1**の越流破堤が発生した。調査の結果、「破堤前の堤防は、浸透の安全性は確保されていたが、越流により裏のり面が侵食し、堤体幅の減少により安全性が低下し、浸透も加わる複合的要因により破堤」としている。

まず、住民や消防団の目撃では、越水は 21:00 頃に開始し、破堤は 23:15 頃とされるので、破堤までの越流継続時間は 2 時間 15 分になる。また、越流深は、直下流にある立野水位観測所（13.0k）の水位履歴である**図 2**のピーク水位 8.29m と HWL の 8.16m からは判明しないが、目撃情報は 30～40cm であるため、本文では 40cm とする。さらに、1 次元不等流計算によると、越流深さ 40cm、越流継続時間は約 4 時間とされている（後述、**図 5** 参照）。なお、破堤から収束までの破堤幅は 30m→119m で推移しているとされるが、破堤停止時間に関する記載は見当たらない。



写真 1 円山川の立野地区の破堤状況：左・近景、右・全景²⁾

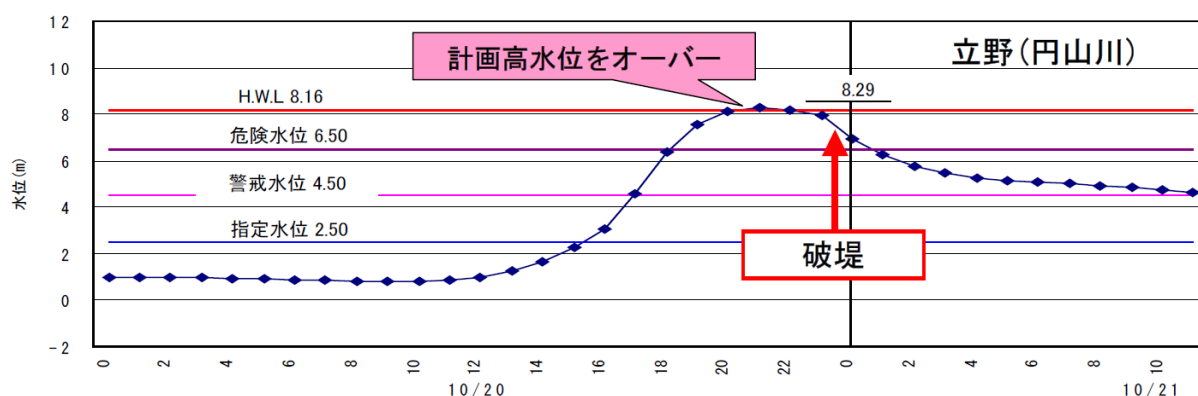


図 2 立野水位観測所（13.0k）の水位履歴²⁾

次に、破堤箇所の堤防高について、報告書での明示は無く、「堤防・河道等が完成していないため、計画高水流量以下の洪水で越流した」と記されているが、落堀の調査結果（天端 T.P.+8.07－堤内地地盤 T.P.+1.16）によれば、6.91m と読み取れる。

上記から、事例 1 では、【越流深 40cm、破堤までの越流継続時間は 2 時間 15 分または 4 時間、破堤幅は 30m→119m、破堤拡大時間と破堤拡大速度は不明】と整理する。

事例 2：出石川・越流破堤

事例 1 と同様に、2004 年 10 月台風 23 号により、出石町鳥居地区の出石川左岸（5.4k）において、写真 2 の越流破堤が発生した。円山川堤防調査委員会の調査の結果では「越流による裏のり面侵食による破堤であり、堤防断面が相当程度減少した状態で、外水圧または浸透の影響もあった」とされている。

破堤に関わる越流特性について、消防団などによると、越水は 18:00 に開始し、23:18 に破堤であるので、破堤に至るまでの越水継続時間は 5 時間 18 分となる。また、越流深さは 30～40cm とされている。一方、平面二次元不等流解析（図 3 参照）によると、越流深さは 47cm（ピーク水位 10.95m－堤防高 10.48m）、越流継続時間は約 4 時間 20 分とされている。さらに、破堤幅について、破堤開始時の破堤幅および破堤停止時刻は明記されていないが、破堤幅の最大は 100m とされている。なお、山付き堤防で樋門がある特殊な場所では、越流深さが 50cm とされている。なお、堤内地の地盤に対する天端高は明記がないが、地質断面図から概略 2～3m と読み取れる。

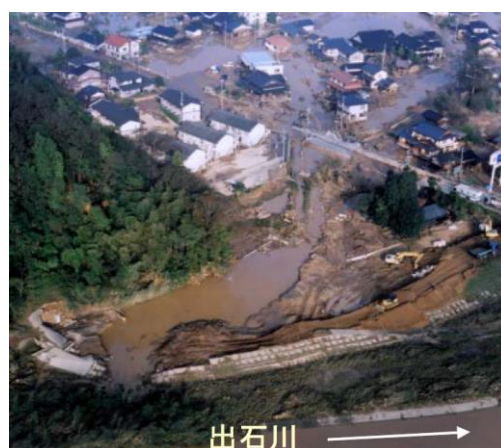


写真 2 出石川の鳥居地区の破堤状況²⁾

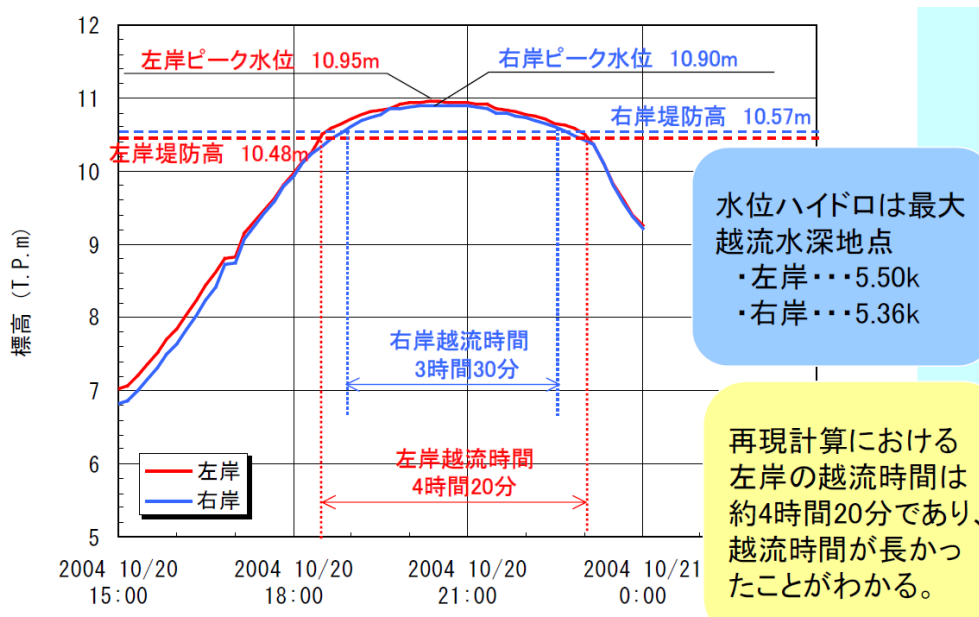


図3 二次元不定流解析による水位ハイドロ²⁾

上記から、事例2では、【越流深は40cmまたは47cm、それぞれの越流深に対する破堤までの越流継続時間は5時間18分または4時間20分、破堤幅は100m、破堤拡大時間と破堤拡大速度は不明】と整理する。

なお、事例1および事例2の堤防の破堤要因は、下記の通りとされており³⁾、いずれも越流が直接的な破堤要因とされている。

【事例1：円山川右岸 13.2k】

「越流による裏のり面侵食」後に「浸透」が加わる複合的要因により破堤したものと推定される。この地点の堤防法線は直線形状であるが、堤防・河道等が完成していないため、計画高水流量以下の洪水で越流して裏のり面（小段も含む）が侵食し、これに浸透が加わり破堤したものと推測される。

【事例2：出石川左岸 5.4k】

「越流による裏のり面侵食」により破堤したものと推定される。この地点は外水の水衝部に相当し、流下能力を超え越流した水が裏法尻部で集中する湾曲した堤防法線形状のため裏のり面の侵食が助長され、破堤したものと推測される。また、堤防断面が相当程度減少した状態において、外水圧または浸透の影響もあったものと推測される。

また、事例1および事例2に関して、次の①～③の堤防強化の基本方針³⁾が出されている。

- ① 「越流による裏法面侵食」については、確立された越流対策工法が現在認められていないため、越水現象そのものを抑制することが重要である。
- ② 「浸透」については、河川水や雨水について、堤防に対しては「水は入り難く、速やかに抜く」原則に則り、浸透対策を推進する必要がある。＊図4参照。
- ③ 当該地域は、地盤沈下の影響を大きく受けているため、地域の地下水揚水実態とその影響の見極めに基づいた、地盤沈下を抑制する施策が非常に重要と考える。

上記の通り、当時は越流に対する堤防強化は対象外とされており、②の浸透対策に対して、表のり被覆工（遮水シート、連節ブロック）、天端アスファルトの敷設、裏のり張芝、築堤材質による復旧が実

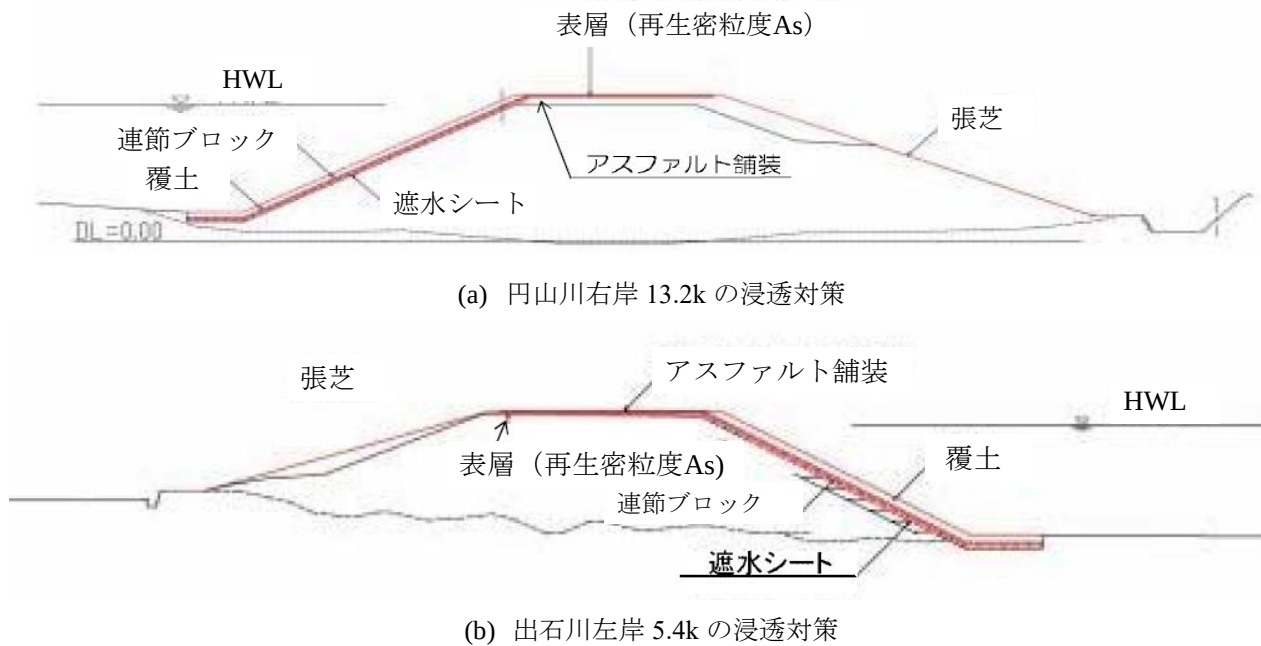


図4 堤防強化のための浸透対策：文献3に加筆（文字張り込み）

施された。これらは2004年当時の対応であり、現在の越流に対して「粘り強い堤防」の整備が意識されたのは、事例1および事例2の発生から11年後の2015年の鬼怒川での越流破堤が契機である。

さらに、越流による破堤危険度の評価が行なわれているが、土研資料第2074号「越流堤防調査最終報告書―解説編―」（S59.3）⁴⁾を引用した最大越流水深と越流時間の関係図である図5において、事例1と事例2の箇所を追記し、鳥居橋上流の左岸（破堤あり）と右岸（破堤なし）（円山川右岸13.2kも併記）について、（総点数90点のうち68点、すなわち75%が破線の下位にあるためか）破堤した左岸は破堤の危険度が高かったとしている。ここで、図5の解釈、取り扱いについては、本文の次章の2.2で

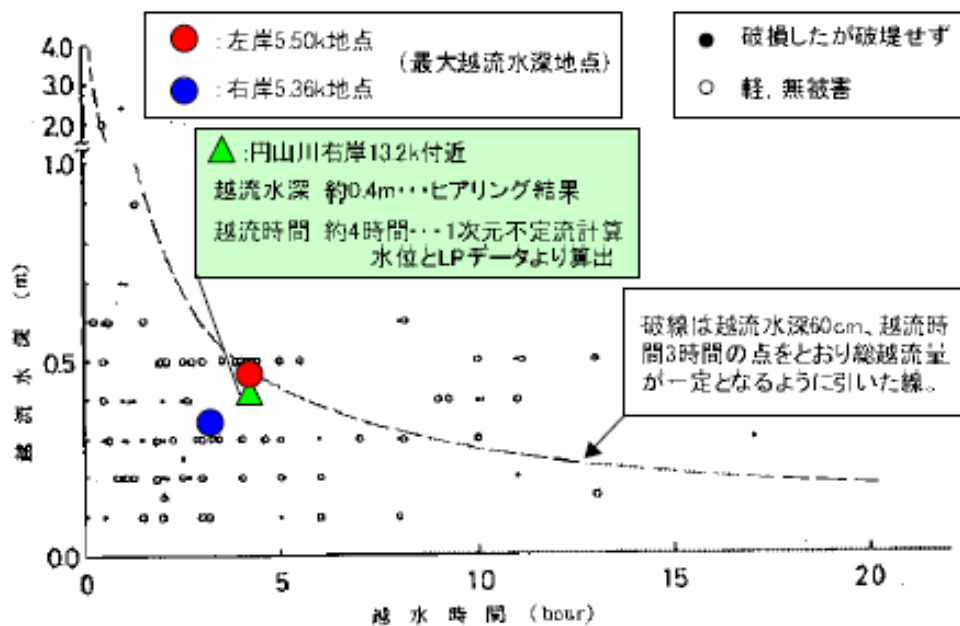


図5 最大越流水深と越流時間の関係⁴⁾

で考察するが、図 5 に記載された破線は越流による破堤の有無を判断するための境界線ではないため、それによる危険度の有無は評価できないことに注意が必要である。

参考文献

- 2) 国土交通省豊岡河川国道事務所：円山川堤防調査委員会資料、第 1 回：平成 16 年 10 月 29 日、第 2 回：平成 16 年 11 月 23 日、第 3 回：平成 16 年 12 月 24 日、第 4 回：平成 17 年 1 月 29 日。
- 3) 豊岡河川国道事務所：円山川堤防調査委員会 報告書、平成 17 年 3 月 30 日。
- 4) 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一解説編一、土木研究所資料 第 2074 号、1984.3。

事例 3：矢部川・基礎地盤パイピング破堤

2012 年 7 月の九州北部豪雨において、みやま市津留地区の矢部川右岸（7.3k）において、基礎地盤のパイピングによる浸透破堤が発生した。写真 3 は 13:20 の破堤後の破堤箇所の浸水の推移であるが、15:30 に破堤の拡大が停止（本文での想定）しており、破堤幅は 50m である。なお、当該破堤は「越流なき破堤」と呼ばれているが、図 1（前述）の通り、破堤には①越流破堤、②基礎地盤浸透パイピング破堤、③堤体浸透破堤、④侵食・洗掘破堤があり、①以外は「越流なき破堤」であるので、今次が特別な破堤とは言えない。

図 6 は、不等流計算による破堤箇所（7.3k）の河川水位の時間変化であるが、決壊は 13:15～13:30 の間とし、13:20 頃と想定されている。また、計画高水位（H.W.L.）を超え始めたのは 8 時頃とされているが、本文では図 6 から 7:45 と読み取る。その結果、破堤までの H.W.L.を超過していた水位の継続時間は 5 時間 35 分と想定される。なお、直接は関係ないが、船小屋水位観測所（15.27k）では、氾濫危険水位 14.09m を 5 時間以上超えていたとされ、流域全体にわたる長時間、高水位の継続が分かる。



写真 3 破堤（13:20）後の推移⁵⁾：破堤拡大停止（本文での想定 15:30）

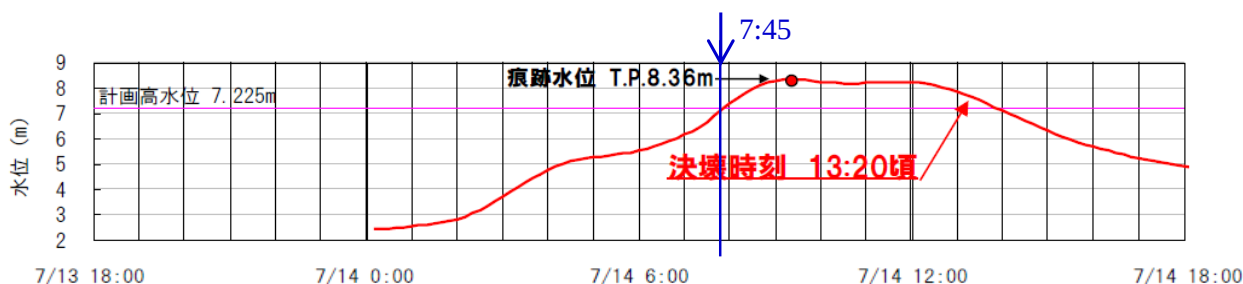


図 6 不等流計算による破堤箇所の河川水位の時刻歴：文献 5 に加筆

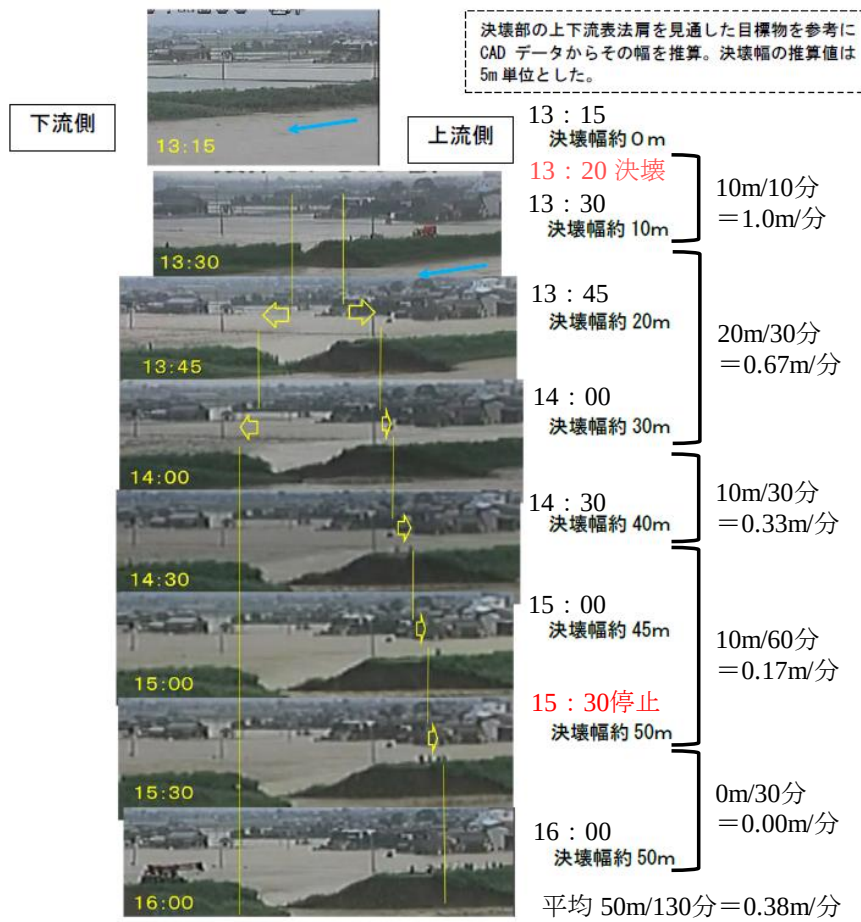


図 7 決壊の進行と破堤拡大速度の算出：文献 5 に加筆

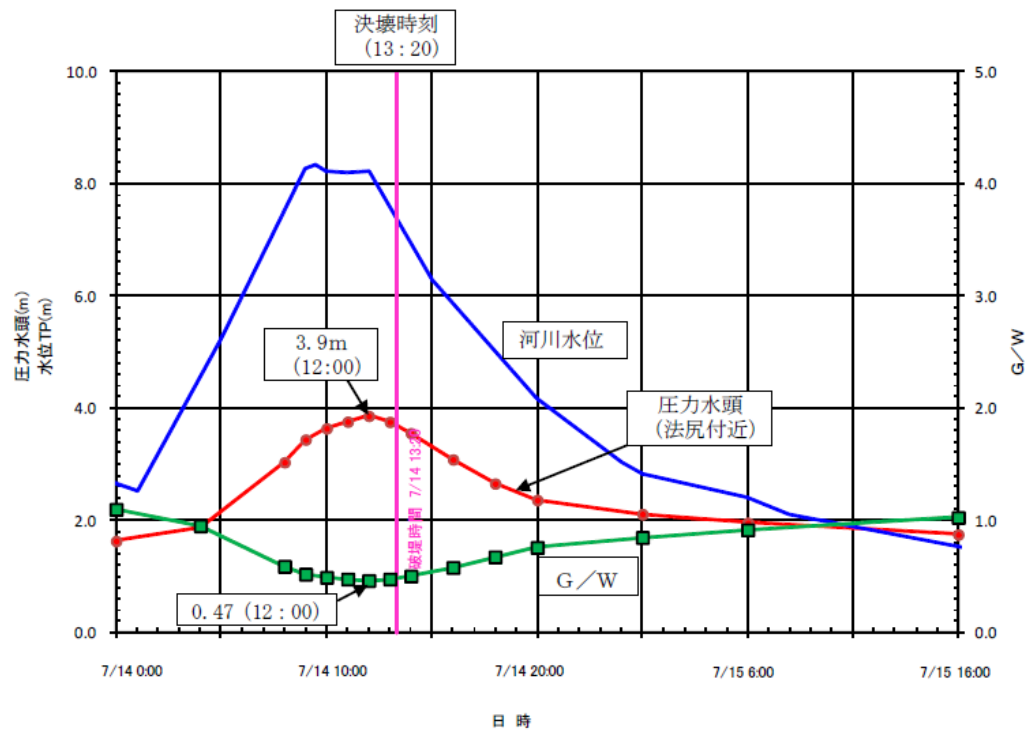


図 8 河川水位、圧力水頭および G/W の経時変化 (B 測線モデル：ケース 4) ⁵⁾

また、図 7 は決壊箇所の対岸に 13:30 頃に設置された CCTV の映像による決壊の進行であるが、同映像から 15:30 に破堤幅が 50m に至った（破堤拡大停止とは明記されていないが、本文では停止と想定）とされる。従って、破堤拡大の継続時間は 2 時間 10 分になる。さらに、13:20 の破堤開始からの破堤幅の拡大速度を見ると、図 7 に追記したように、1.0m/分→0.67m/分→0.33m/分→0.17m/分（平均：0.38m/分）と推移（低下）している。これは、図 6 から分かる通り、破堤は河川水位の低下過程で発生しており、水位低下により堤防の破堤断面に対する流入水の侵食力が低下し、破堤の拡大が抑制され、破堤幅が 50m に留まったと推測される。これは図 8 の圧力水頭の上昇、それに伴う動水勾配（G/W）の低下が、それぞれ 12:00 の 3.9m および 0.47 に至るまで 12 時間ほど経過しており、浸透による不安定化（パイピング発生）までに長時間を要したことからも推測できる。この点は、河川水位が上昇過程あるいはピーク付近で発生する越流破堤と違う点と推測している。

上記から、事例 3 では、【越流はなく、破堤までの HWL を超過継続時間は 5 時間 35 分、破堤幅は 50m、破堤拡大速度は 1.0m/分→0.67m/分→0.33m/分→0.17m/分（平均：0.38m/分）】と整理する。

なお、事例 3 の破堤要因は、下記の通りとされている⁶⁾が、基礎地盤の砂礫層の浸透によるパイピングが破堤要因である。

堤防破堤原因は、堤防を横断する形で河岸から堤内地に連続して分布する基礎地盤の砂礫層（Dg 層）の圧力が大きくなり、堤防のり尻付近において砂礫層上部を覆っていた被覆土層（透水性の低いシルト質砂層及び耕作土層）を破壊し、シルト質砂を巻き込んで漏水・噴砂が生じたものと推察される。なお、砂礫層の噴砂に伴い砂礫層の空隙が堤防裏法尻付近に進行し、堤体裏のり下部が沈下・陥没したものと推定される。

また、事例 3 の基礎地盤の浸透破堤箇所の本復旧に関して、次の①～④に留意するとされている（図 9 参照）⁶⁾。

- ① 堤防の川表側の遮水矢板と高水護岸により、基礎地盤上部の砂層及び砂礫層からの河川水の浸透を遮断する。
- ② 応急復旧で埋め戻した落堀の土砂、根固めブロック等を除去し、基礎地盤も含め良質土で置き換え、堤体を再構築する。また、堤防ののり面は一枚のりとする
- ③ 宅地側の堤脚部の砂層上部にトレンチ工（ドレーン工）を設置し浸透水の安全な排水を図り、基礎地盤への浸透による漏水等を抑制する。

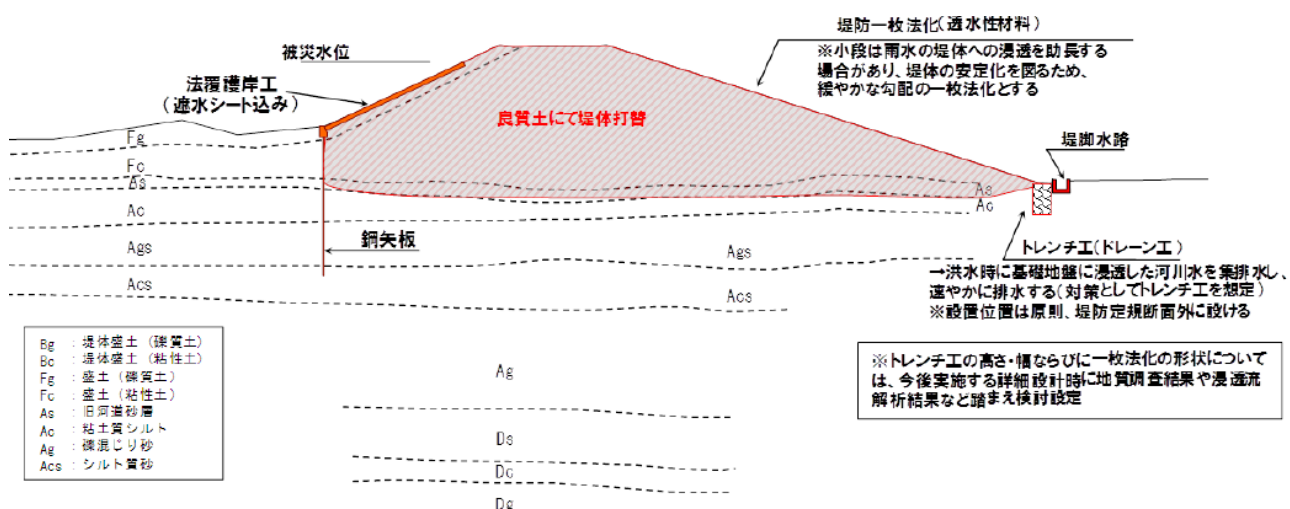


図 9 破堤箇所 (7.3k) の対策工法 (案)⁶⁾

- ④ 上記の復旧工法の範囲は、基礎地盤上部に分布する砂層の縦断分布の範囲を目安に、緩衝区間を確保して設定する。

参考文献

- 5) 国土交通省筑後川河川事務所：矢部川堤防調査委員会資料、第1回：平成24年8月2日、第2回：平成24年9月12日、第3回：平成24年10月18日、第4回：平成25年3月12日。
6) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員 報告書、平成25年3月。

事例4：鬼怒川・越流破堤

2015年9月関東・東北豪雨では、常総市三坂地区の鬼怒川左岸（21.0k）で越流破堤が発生した。写真4は越流開始時の状況であるが、11:11には越流が開始しており、12:10頃にパトロール車の車体底部までの高さ（約20cm）の越流深が確認されている^{7),8)}。

また、図10は破堤地点の上流の鎌庭観測所（27.34k）と下流の水海道水位観測所（10.95k）の水位の推移（1時間間隔のデータであるが、本文ではこれを使用）であるが、ピーク水位はそれぞれ12時の5.76mおよび13時の8.06mとされ、いずれも堤防高より低い。なお、水海道水位観測所では、H.W.L.の超過継続時間は5時間とされている。



写真4 越流開始（11:11）前後の状況⁷⁾

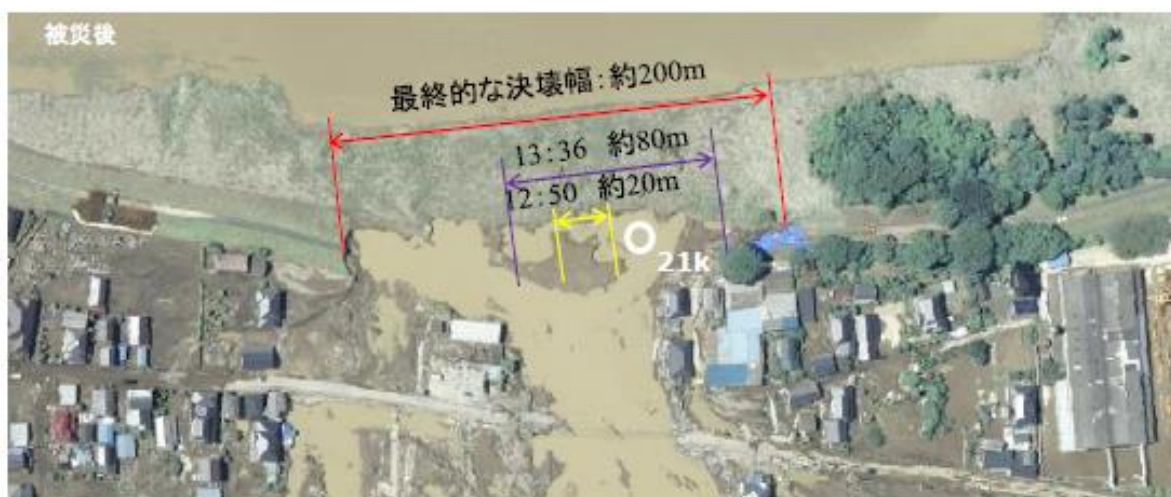


写真5 破堤幅の推移⁷⁾

ここで、**図10**によれば、破堤箇所（21.0k）の上流の水位観測点の鎌庭地点（27.34k）では、水位のピークは12時に5.76mであり、他方、下流側の鬼怒川水海道地点（10.95k）での水位のピークは13時に8.06mである。従って、水位は3地点の距離と比例関係があると見なし、破堤地点では、上流の鎌庭地点から23分後の12:23に水位がピークに達し、両観測地点のピーク水位から、破堤地点の水位は6.65m（Y.P.21.19m）と推定する（**図11**参照）。

また、鎌庭地点のピーク前の6時の水位4.46mと12時の水位5.76mからは、水位上昇速度は0.21m/時程度になるので、破堤地点も同様な上昇率として、12:10から12:23までに0.05m増加したと推定する。同様に、鬼怒川水海道地点の水位変化からは0.11mの増加と推察する。これらから、12:10頃に確認されているパトロールのライトバンの車体底部までの高さ（実測値：20cm程度）の越流深は、その後増加し、ピーク水位時の越流深は、 $20\text{cm} + 5 \sim 11\text{cm} = 25 \sim 31\text{cm}$ 程度になるが、本文では推定値を31cmとしている⁷⁾。

さらに、破堤地点の対岸の篠山水門のカメラが破堤開始と同時に撮影開始した時刻は 12 時 52 分 16 秒である。従って、越流開始を 11:11、破堤開始を 12:52 頃とすると、破堤開始までの越流継続時間は 1 時間 41 分になる⁹⁾。

また、**写真 5** は破堤幅の時間推移であり、破堤開始は 12:50（破堤幅約 20m）、破堤は上下流方向に拡大し、最大破堤幅は約 200m である。破堤箇所の近傍で撮影された写真などによれば、13:27～15:18 までの破堤幅はほぼ同じ程度である。さらに、15:40 では 14:16 よりやや下流側に侵食が拡大し、16:19 の写真によれば、破堤区間が 200m 付近まで拡大し、水位は Y.P.20m 程度に低下していることから、破堤の拡大は停止と推測する。これらから、破堤の進行継続時間は 3 時間 30 分程度とする。なお、**表 1** は破堤の開始から停止までの破堤幅、破堤拡大速度であるが、破堤拡大速度は堤防の粘り強さの指標になる。

上記から、事例 4 では、【越流深は 20cm または 31cm、破堤までの越流継続時間は 1 時間 41 分、破堤拡大継続時間は 3 時間 27 分、破堤幅は 20m→80m→140m→200m、破堤拡大速度は 1.3m/分→0.57m/分→1.0m/分】と整理する。

表 1 越流開始、破堤開始から破堤拡大停止までの推移

時 刻	11:11(想定)	12:52(想定)	13:36	15:18	16:19(推定)
堤防状況	越流開始	破堤開始	破堤拡大	破堤拡大	拡大停止
破 堤 幅		20m →	80m →	140m(推定) →	200m
所要時間	1時間41分	44分	1時間42分	61分	
破堤拡大速度		1.3m/分	0.57m/分	1.0m/分	

なお、事例 4 の破堤要因は、下記の通りとされている⁸⁾が、越流による侵食が主要因であり、基礎地盤のパイピングの可能性も指摘されている。

- ・鬼怒川流域における記録的な大雨により、鬼怒川の水位が大きく上昇し、決壊区間において水位が計画高水位を超過し堤防高も上回り、越水が発生した。
- ・越水により川裏側で洗掘が生じ、川裏法尻の洗掘が進行・拡大し、堤体の一部を構成する緩い砂質土（As1）が流水によって崩れ、小規模な崩壊が継続して発生し、決壊に至ったと考えられる。
- ・越水前の浸透によるパイピングについては、堤体の一部を構成し堤内地側に連続する緩い砂質土（As1）を被覆する粘性土（Bc 及び T）の層厚によっては発生した恐れがあるため、決壊の主要因ではないものの、決壊を助長した可能性は否定できない。
- ・浸透による法面すべりや川表の侵食が決壊原因となった可能性は小さいと考えられる。

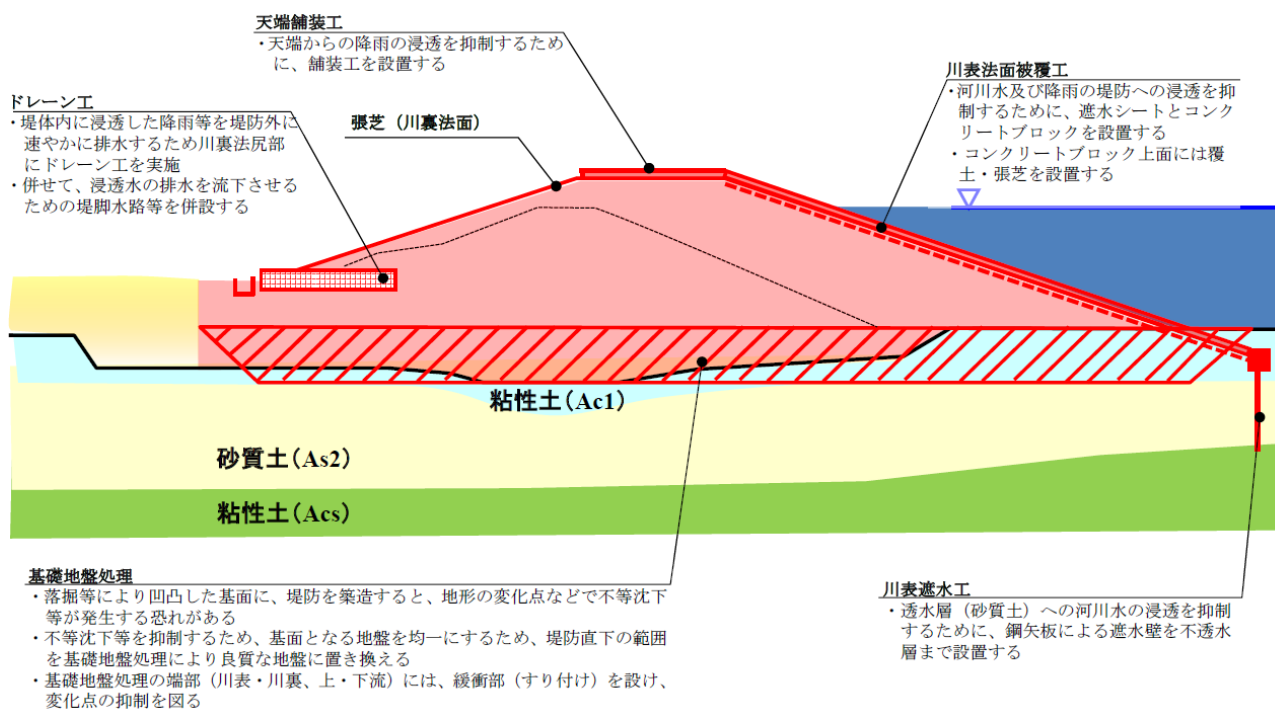


図 12 本復旧工法 (案) 横断模式図⁸⁾

また、事例 4 の越流破堤箇所の本復旧に関して、下記が提起されている (要点抜粋、図 7 参照)⁸⁾。

- ・川表法面被覆工: 河川水、降雨の堤防への浸透を抑制する遮水シートとコンクリートブロック設置。
コンクリートブロックの上面に覆土・張芝を設置。
- ・川表遮水工: 矢板による遮水壁を不透水層まで設置。堤脚水路等を併設。
- ・ドレーン工: 堤体内に浸透した雨水等を堤防外に排水。
- ・天端舗装工: 天端からの降雨の浸透を抑制する舗装工。
- ・基礎地盤処理: 堤防直下の範囲を良質な地盤に置き換え。端部は緩衝部を設置。

参考文献

- 7) 国土交通省関東地方整備局: 鬼怒川堤防調査委員会資料、第 1 回: 平成 27 年 9 月 28 日、第 2 回: 平成 27 年 10 月 5 日、第 3 回: 平成 27 年 10 月 19 日、第 4 回: 平成 28 年 3 月 7 日。
- 8) 鬼怒川堤防調査委員会: 鬼怒川堤防調査委員会 報告書、平成 28 年 3 月。
- 9) 常田賢一: 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による破堤に伴う落堀に関する現地調査からの考察、第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム、一般論文 I-1、2015.12。

事例 5: 吉田川・越流破堤

2019 年 10 月台風 19 号では、宮城県の大郷町粕川地区の吉田川左岸 (20.9k) で越流破堤が発生した。吉田川は鳴瀬川流域であるが、管理延長 31.9km のうち、約 27km の区間で計画高水位を超過し、吉田川 20.9k 付近の堤防決壊のほか、32 箇所で越水、溢水が発生している⁸⁾。

写真 6 は 10 月 13 日の 6 時頃の越水の状況であるが、パラペットの背後に設置された大型土のうが一部流出し、その背後の裏法部 (この部分が、初期決壊箇所) が侵食、崩壊している。また、**写真 7** は 10 月 14 日の 10 時頃の破堤箇所の状況であるが、初期決壊箇所は約 20m であり、破堤幅は最終的に上下流方向に 100m まで拡大している。



写真6 越流の状況：10月13日6時ごろ¹⁰⁾

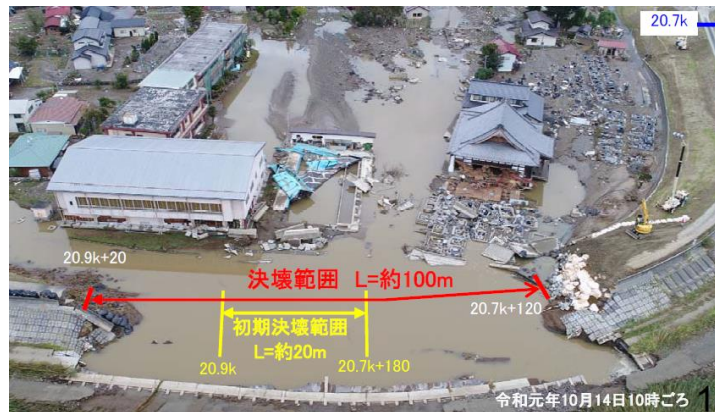


写真7 破堤状況：10月14日10時ごろ¹⁰⁾

図13は、決壊地点の水位であり、粕川水位観測所の水位（観測水位 9.92m、TP+11.44m）から水面勾配を考慮して換算されている。同図から、計画高水位（TP+9.98m）の超過時間は約6時間、堤防高（TP+11.18m）の超過時間は約4時間とされているが、それぞれ1:20から8:00（本文での読み取り）までの6時間40分ほどおよび2:50から6:10（本文での読み取り）までの3時間20分ほどである。また、4:10に最高水位がTP+11.58mであるので、越流深は最大で40cmになる。

さらに、CCTVカメラにより、6:10に川裏部の崩壊、7:53に堤防の決壊が確認されているが、写真6の状況からは6:10の直後に破堤したと考えて、本文ではそれぞれを破堤開始とすると、破堤までの越流継続時間はそれぞれ3時間20分および5時間3分となる。さらに、写真7の通り、破堤の初期の破堤幅は約20mとされ、11:53に決壊幅100mが確認されているが、11:53を破堤拡大の停止とすると、破堤拡大時間は5時間43分（11:53～6:10）あるいは4時間（11:53～7:53）となり、破堤拡大速度（平均）は0.23～0.33m/分である。

ここで、事例4の鬼怒川の破堤と比較すると、破堤拡大時間は同程度以上であるが、破堤拡大幅が100m程度であるのは、破堤が河川水位の低下過程（侵食力低下）であること（図13）、初期破堤箇所の下流側の裏法に擁壁（侵食抑制効果）があること（写真6）などによると思われる。さらに、平面二次元流況解析により破堤箇所の河道内の平面的流速分布は図14とされて、河道内の流れは概ね低水路法線と同じ、破堤箇所の前面流速は2～3m/sと推定されているが、破堤箇所の下流方向の流れは河岸から離れる方向（外力低下）にあることも関係していると思われる。

上記から、事例5では【越流深は40cm、破堤までの越流継続時間は3時間20分または5時間3分、破堤拡大継続時間は4時間または5時間43分、破堤幅は20m→100m、破堤拡大速度は0.23～0.33m/分】

と整理する。

なお、当該箇所の決壊要因の可能性について、表 2 の通り、越水が要因とされている。

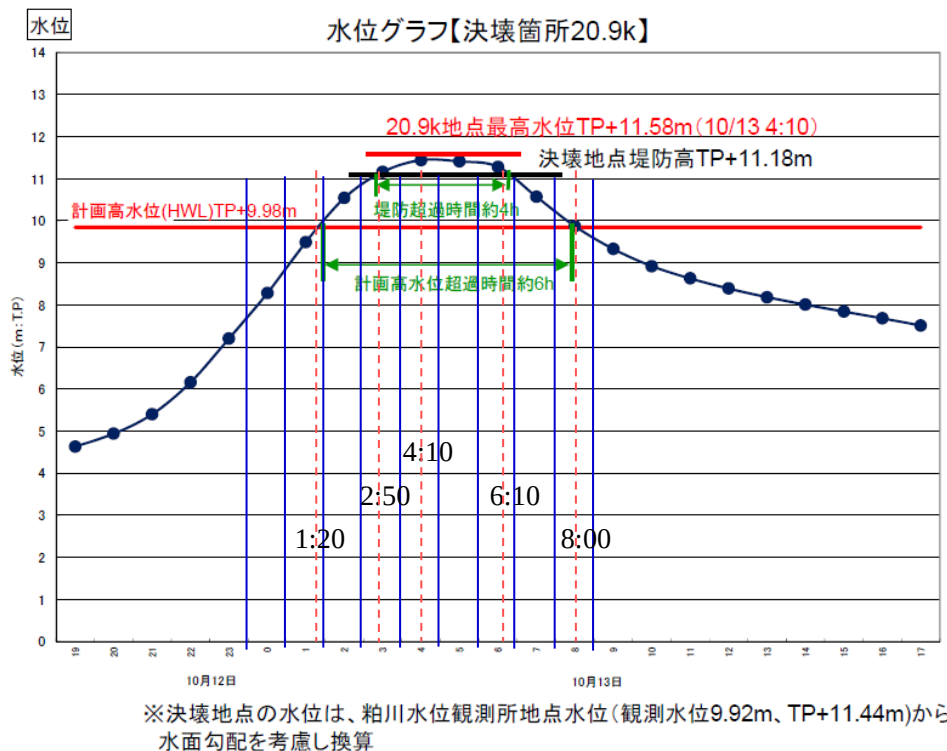


図 13 決壊箇所の水位：文献 10 に加筆

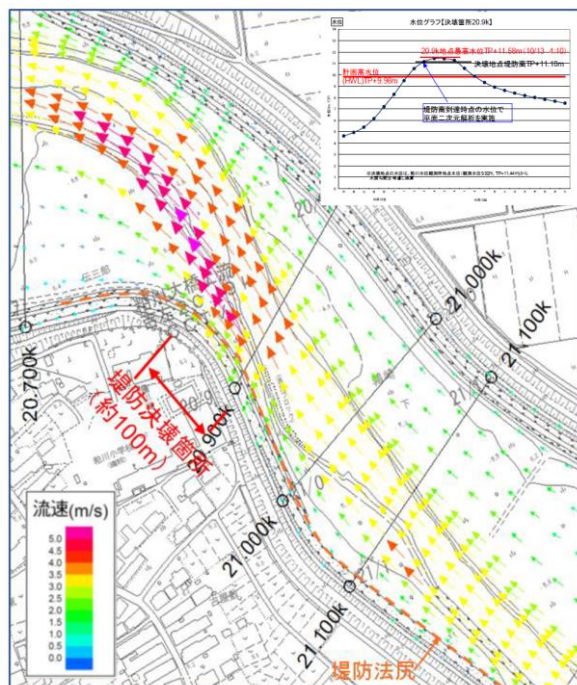


図 14 再現計算による流速分布図¹⁰⁾

表2 吉田川右岸 20.9k の堤防決壊要因¹¹⁾

決壊要因の可能性			影響程度
越水		決壊区間では越水が生じており、越流水による川裏部の洗堀が映像により確認されていることから、「越水」による洗堀が決壊の要因になったことが推定される。	○
浸透	すべり破壊	- 決壊箇所の盛土層構成の詳細は不明であるが、今次出水の降雨・水位を考慮した安定計算を実施した結果、照査基準値を満足しており、現場の状況からも堤体のすべりが疑われる現象が確認されていない。 - 上記の状況から、すべり破壊が決壊の主要因となった可能性は低いと推定される。	—
	パイピング破壊	- 決壊箇所の基礎地盤は、パイピングが起きやすい地質構成になっていない。 - 今次出水の降雨・水位を考慮した安定計算を実施した結果、照査基準値を満足している。 - 現場の状況からも基盤漏水などのパイピングが疑われる現象が確認されていない。 - 上記の状況からパイピング破壊が決壊の主要因となった可能性は低いと推定される。	—
本川による側方侵食		- 川表には護岸が施工されており、決壊箇所の上下流に残存する護岸を調査した結果、現場の状況からも護岸のめくれ等が無く側方侵食を疑われる現象は確認されていない。 - 上記の状況から、侵食が決壊の主要因となった可能性は低いと推定される。	—

また、事例5の破堤箇所の本復旧に関して、下記が提起されている（要点抜粋、図15参照）¹¹⁾。

- ・表法面被覆工：河川水、降雨の堤防への浸透を抑制するコンクリートブロック（連節ブロック）、遮水シートを設置。
- ・天端舗装工：天端からの降雨の浸透を抑制、法肩の崩壊の進行抑制の舗装工。
- ・基礎地盤処理：堤防直下の範囲を良質な地盤に置き換え。端部は緩衝部を設置。
- ・裏法尻補強工：深掘れの進行抑制のため、ブロック等で補強。
- ・浸透に対する強化工法：ボーリング調査、浸透流解析により必要に応じて実施。

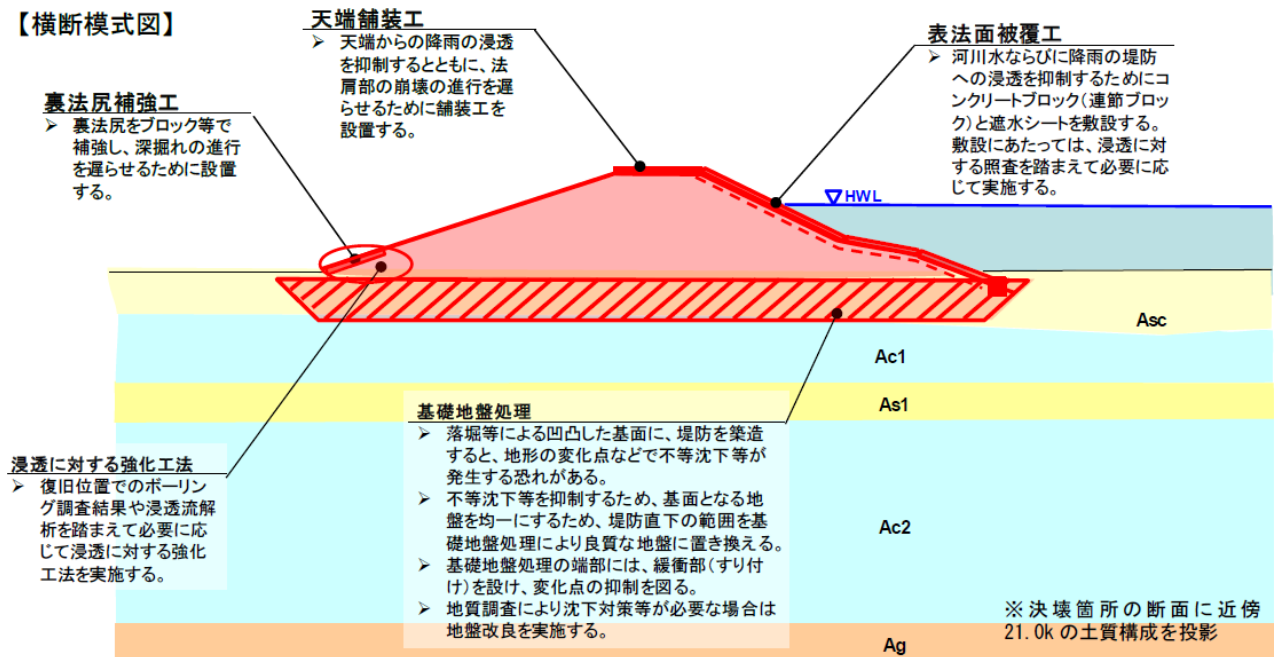


図15 本復旧の横断模式図¹¹⁾

ここで、事例 4（鬼怒川）との差異は、上記の太字（著者加筆）が追記され、表法面被覆工のコンクリートブロックの上面に覆土・張芝の設置、川表遮水工、裏法尻のドレーン工の記載が無いことである。なお、新たに追記された裏法尻補強工は、鬼怒川の越流破堤の後に提起された“危機管理型ハード対策”の天端と裏法尻の補強のうち、裏法尻に相当している。

参考文献

- 10) 国土交通省東北地方整備局：鳴瀬川堤防調査委員会資料、第 1 回：令和元年 10 月 16 日、第 2 回：令和元年 11 月 7 日、第 3 回：令和元年 12 月 3 日。
- 11) 鳴瀬川堤防調査委員会：鳴瀬川堤防調査委員会 報告書、令和 2 年 6 月。

事例 6：千曲川・越流破堤

2019 年 10 月台風 19 号により、長野市穂保地区の千曲川左岸（57.5k 付近）で越流破堤が発生した。同破堤箇所は、桜つつみ堤として計画断面は完成していたこと、CCTV カメラの設置地点であり、越水から破堤によりカメラが倒壊するまで映像が撮れていること、危機管理型水位計の設置地点であり、破堤により水位計が流出まで水位が記録されていることなどが、他の事例と比較して特筆できる。

写真 8 は、破堤後の浸水の状況、推移であるが、最終的な破堤幅は 70m とされている。

写真 9 は、堤防破堤箇所に設置されていた CCTV カメラの映像記録（5 分間隔）であるが、①の 10 月 13 日の 1:00 は越流開始（0:55）の直後の状況であり、⑧の 2:15 の映像までであり、5 分後の 2:20 ではカメラ調整中となり映像が撮れてなく、CCTV カメラの支柱が倒壊したとされている。支柱の倒壊は、越流により CCTV カメラが設置された裏法肩が侵食、流出し、さらに破堤の開始と推察ができる。



撮影 2019年10月13日 6:20頃



撮影 2019年10月13日、10:00頃



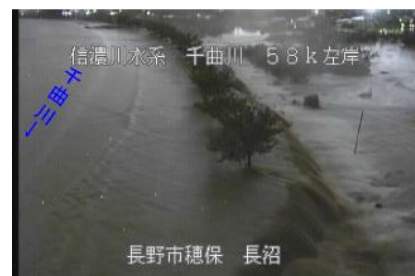
写真 8 越流と破堤の状況^{12,13)}：左・6:20 頃、中・10:00 頃、右・13:10 頃



①2019.10.13 1:00 越水開始直後



⑥2019.10.13 2:00



⑧2019.10.13 2:15

写真 9 破堤箇所に設置された CCTV の映像記録：文献 12、13 から抜粋

また、破堤箇所の表法肩に危機管理型水位計が設置されており、図 16 の水位の記録が得られている。同図は、水位が 0:30 頃に堤防天端（338.2m）を超え、2:40 にピーク水位（339.0m）を記録している。

上記から、越流特性に関して、越流開始時刻は CCTV で 0:55、水位計で 0:30 であり、破堤開始は CCTV で 2:20（本文での想定）、水位計で 3:50（同）である。なお、図 16 には、0:55、2:20 および水位計の記録の終端を破堤時刻として図 16 から読み取った 3:50 を追記している。

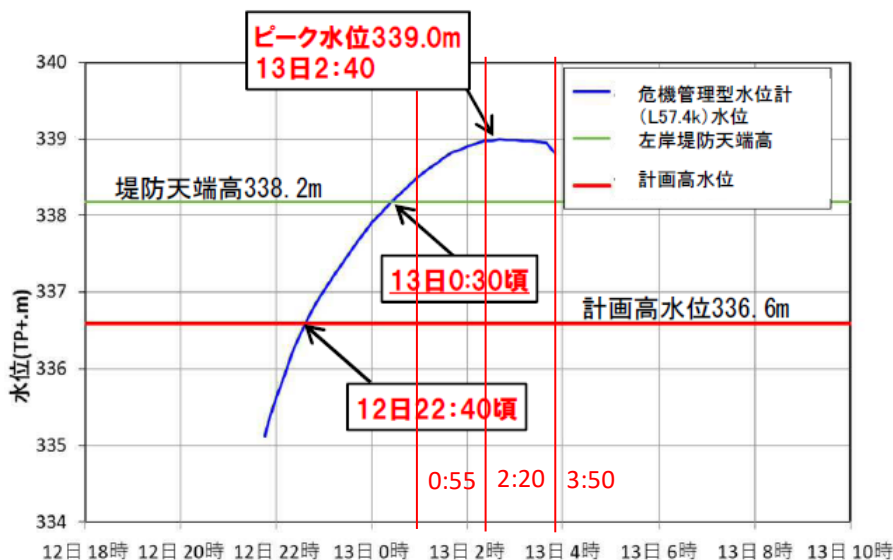


図 16 千曲川左岸 57.4k 危機管理型水位計：文献 12、13 に加筆

表 3 千曲川左岸 57.4k の堤防決壊要因¹³⁾

決壊要因の可能性			影響程度
越水		監視カメラから越流が生じているのが確認されており、堤防決壊地点の上下流区間も川裏法尻に越流水による洗掘等が確認されている。これらのことから、越流によって堤防等の欠損が発生し決壊の主要因になったと推定される。	○
浸透	パイピング破壊	- 堤防決壊地点の基礎地盤は厚い粘性土層の分布が確認されており、パイピングが起きにくい地質構成になっている。 57.4k 付近は川表から川裏にかけて透水性の高い層は連続していない。なお、今次出水の降雨・水位を再現した外力条件をもとに浸透流解析を実施した結果、照査基準値を満足しており、浸透に対する安全性は確保されていた。 - 被災後の現地調査からも噴砂跡等は確認されていない。これらのことから、パイピングが主要因となった可能性は低いと推定される。	×
	すべり破壊	- 今次出水の降雨・水位を再現した外力条件をもとに浸透流解析を実施した結果、照査基準値を満足しており、浸透に対する安全性は確保されていた。 - また、越流時の洗掘により堤防等が痩せていく過程ですべり破壊が生じた可能性は排除できないが主要因ではないと言える。	×
侵食		堤防決壊箇所の上下流とも川表法面に目立った侵食の痕跡は確認できないことから、決壊の主要因となった可能性は低いと推定される。	×

○：決壊への影響は大 ×：決壊への影響は低い

従って、破堤までの越流継続時間は、CCTV で 1 時間 25 分、水位計では 3 時間 20 分と想定できるが、越流開始時刻は水位計が 25 分早く、破堤開始時刻は水位計が 1 時間 30 分遅いため、破堤に至る越流継続時間は水位計の方が 1 時間 55 分長くなる。そのため、本文では、越流開始は CCTV の目視映像、破堤開始は表法肩にある水位計を根拠として、2 時間 55 分 (0:55→3:50) とする。

さらに、越流深は図 16 から 0.8m (=339m-338.2m) であるが、破堤の拡大停止時間は明記されていない。そのため、破堤拡大継続時間、破堤拡大速度は不明である。

上記から、事例 6 では、【越流深は 80cm、破堤までの越流時間は 2 時間 55 分、破堤幅は 70m であり、破堤拡大継続時間、破堤拡大速度は不明】と整理する。

なお、当該箇所の決壊では、表 3 の 4 つの決壊要因について検証し、越水を主要因としている¹³⁾。

また、決壊地点の対策方法(案)では、被災前と同様な計画断面とし、桜づつみも復旧するが、「令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会」での議論を踏まえて、コンクリートブロックによる表面被覆型の堤防強化としている。対策メニューは、次の通りである(*は本文での追記、図 17 参照)。

- ・法覆護岸：高水位・長時間継続の洪水特性、堤防の安定性のための法覆護岸(大型ブロック張+遮水シート)を設置。
- ・鋼矢板：置換土と既存地盤の一体性のために設置。*基礎地盤が粘土層のためか、遮水性は不要。
- ・天端舗装工：降雨の浸透を抑制。
- ・天端保護工：桜づつみの天端補強と天端舗装との一体化。
- ・法面補強工：越水による決壊までの時間の引き延ばし、裏法面の一連補強のコンクリートブロックを設置。
- ・縁切材：本堤と桜づつみの境界に吸出防止材を設置。
- ・法留基礎工：法面補強コンクリートブロックの支持。*ドレーンの記述は無いが、図では記載。
- ・基礎地盤処理：(厚い粘性土、弱層がない)良質土により埋め戻し。*地盤改良は無し。

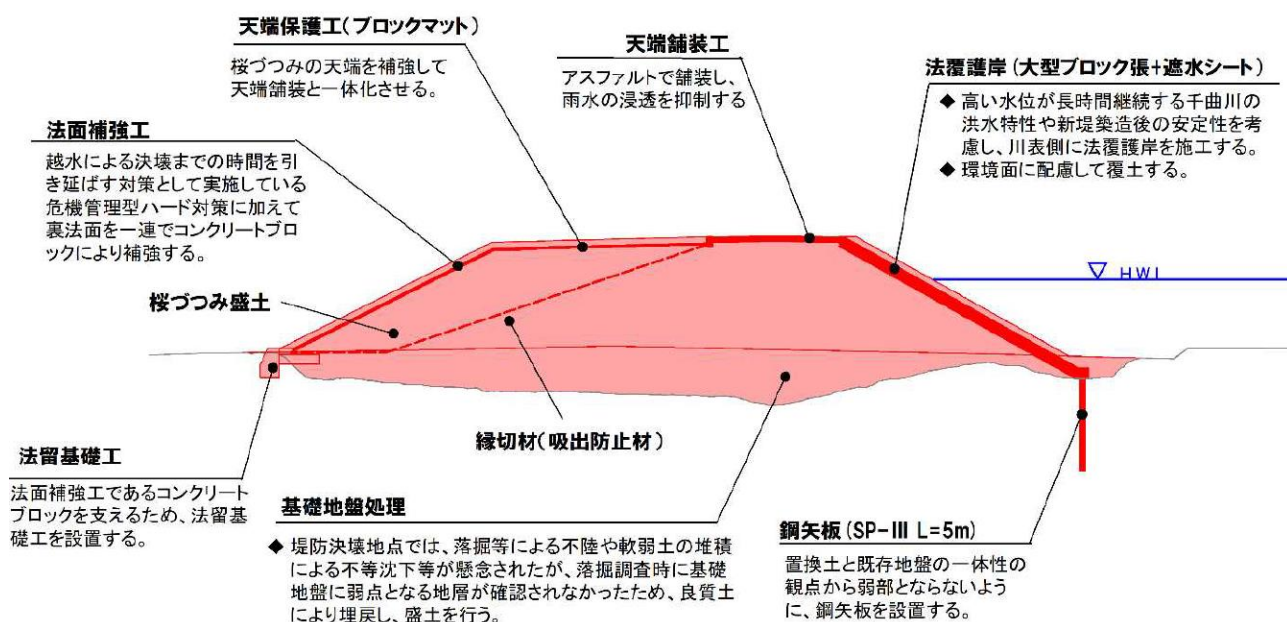


図 17 堤防決壊地点(左岸 57.5k 付近)の復旧断面(参考)¹¹⁾

参考文献

- 12) 国土交通省北陸地方整備局：千曲川堤防調査委員会資料、第1回：令和元年10月15日、第2回：令和元年11月13日、第3回：令和元年12月4日、第4回：令和2年2月14日、第5回：令和2年2月19日。
- 13) 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会 報告書、令和2年8月。

2. 堤防の破堤に関する性能評価に関する考察

前章の事例1～事例6の破堤事例などに基づいて、洪水時の河川堤防の破堤、特に越流破堤に関する耐越流性能の視点から、性能評価の考え方を考察する。

2.1 破堤事例の総括

表4は、事例1～事例6について、破堤原因、堤防高、越水開始時刻、破堤開始時刻、越流から破堤までの越流継続時間、越流深、破堤幅の変化、破堤拡大停止時刻、破堤拡大継続時間、破堤拡大速度などを抽出し、整理している。

表4 破堤事例の耐越流性能などの比較例

破堤事例	災害名 河川名	発生年月 破堤箇所	破堤原因 堤防高	越流開始時刻 破堤時刻	越流継続時間 破堤拡大停止時刻	越流深 破堤幅(推移)	破堤拡大継続時間 破堤拡大速度
事例1	台風23号	2004.10	越流	21:00	2時間15分 4時間	0.4m	—
	円山川	豊岡市立野	6.9m	23:15	—	30m→119m	—
事例2	台風23号	2004.10	越流	21:00	4時間20分/5時間18分	0.47m/ 0.4m	—
	出石川	出石町鳥居	2～3m	23:15	—	100m	—
事例3	九州北部豪雨	2012. 7	パイピング	HWL超過 7:45	HWL超過：5時間35分	—	2時間10分
	矢部川	みやま市津留	6.6m	13:20	15:30	10m→50m	平均 0.38m/分*
事例4	関東・東北豪雨	2015. 9	越流	11:11	1時間41分	0.2m/0.31m	3時間27分
	鬼怒川	常総市三坂	2～3m	12:52	16:19	20m→200m	1.3→0.57→1.0m/分
事例5	台風19号	2019.10	越流	2:50	3時間20分/5時間3分	0.4m	4時間/5時間43分
	吉田川	大郷町粕川	6m(特殊堤)	6:10～7:53	11:53	20m→100m	0.23～0.33m/分
事例6	台風19号	2019.10	越流	0:55	2時間55分	0.8m	—
	千曲川	長野市穂保	5m	3:50	—	70m	—
						*: 1.0→0.67→0.33→0.17m/分	

ここで、事例3の矢部川の破堤だけが基礎地盤のパイピングに起因する浸透破堤であるが、この場合は、越水開始時刻は計画高水位 HWL 超過時刻、越流継続時間は HWL の超過継続時間としている。表中の数値の根拠（報告書記載、想定など）は、前章の各事例を参照されたい。

本文では、事例数、データ数が限られているが、表4の結果から、越流破堤の5事例について、同一箇所での複数の越流深、越流継続時間も考慮して、越流深～越流継続時間の相関を描くと図18になる。同図から、越流深について、千曲川以外は50cm以下であり、概ね2/3が30cm～40cm程度である。また、越流継続時間は、概ね2時間～5時間程度であるが、2/3が2時間～4時間程度である。

さらに、矢部川の浸透破堤を含めて、破堤幅～破堤拡大継続時間の相関を描くと図19になる。同図には、破堤拡大継続時間が不明な円山川、出石川、千曲川は破堤幅のみ併記しているが、破堤幅について

て、鬼怒川以外は概ね 50m～120m 程度である。また、浸透破堤は 1 例（矢部川）だけであるが、同図においては、越流破堤よりも破堤拡大継続時間が短い。

ここで、浸透破堤と越流破堤の差異として、破堤拡大継続時間あるいは破堤幅が関係すると思われるが、水位（変化）との関係など、今後の検証が必要である。

なお、破堤開始時の破堤幅は、円山川（30m）、矢部川（10m）、鬼怒川（20m）、吉田川（20m）であり、概ね 10m～30m 程度である。

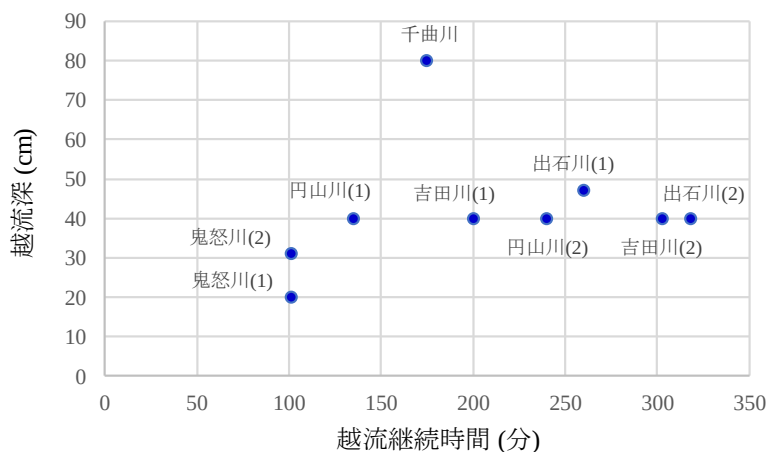


図 18 越流深～越流継続時間の関係

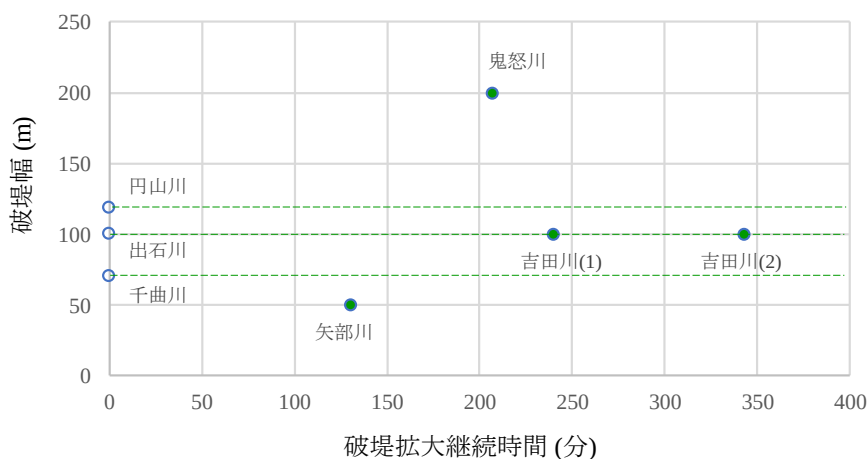


図 19 破堤幅～破堤拡大継続時間の関係

2.2 既往の越流事例との比較における考察

1) 最大越流水深と越水時間の相関

須賀・橋本・石川・藤田・葛西・加藤⁴⁾は（以下、須賀ら）、昭和 42 年～51 年（1967～1976 年）に生じた越水事例から、最大越流水深と越水時間を調べ、「越水したが破堤しなかった事例」の越水時間と最大越流水深の関係を図 20 で示している。同図により、越流水深は 60cm 以下が圧倒的に多く、越水時間は 5 時間以内に集中しているとされている。また、図中の破線は、越流水深 60cm、越水時間 3 時間の点（著者、青線を追記）を通り、総越流量が一定となるように引かれており、総点数 90 点のうち、68 点が同破線より下にある（75.6%）とされている。ここでの注意は、総越流量とは、図中の「流水深×越水時間の面積」であり、実際の浸水総量は越流流速、越流堤防延長が関係するので異なること、言い

換えと、ある同じ越流流速と越流堤防延長の下での総越流量であることに注意が必要である。

そして、須賀らは、仮にこのような強度を有する耐越水工法が開発されれば、超過外力の約 75%が堤防強度内に収まることから、3 時間程度持ちこたえれば、住民は十分避難できるので、最悪の事態は避けられるとし、越流水深 60cm で 3 時間「持ちこたえること」が一つの目安と考えられるとされている。ここでの注意は、「超過外力の約 75%が堤防強度内に収まり、残りの 25%は破堤する恐れがある」とされているが、「25%に当たる堤防も破堤はしていない」ので、破堤の判断の目安の意味ではないという点である。

いずれにしても、「越流水深 60cm で 3 時間持ちこたえること」は堤防の性能評価の見方であり、その場合、「越水開始からの避難時間」が評価指標であり、「越流水深 60cm で 3 時間」は評価基準となる。

上記から、図 20 は本文の事例 2 の図 5 のように、堤防の越流特性の基礎資料として幅広く参考にされてるが、60cm・3 時間を超えた場合、破堤が発生することは意味していないこと、図 20 の破線は破堤の有無の判断の境界線ではないことに注意が必要である。それは、図 20 に記載された 90 点のデータは越水しても破堤しなかった事例であり、破堤した事例が含まれていないからである。

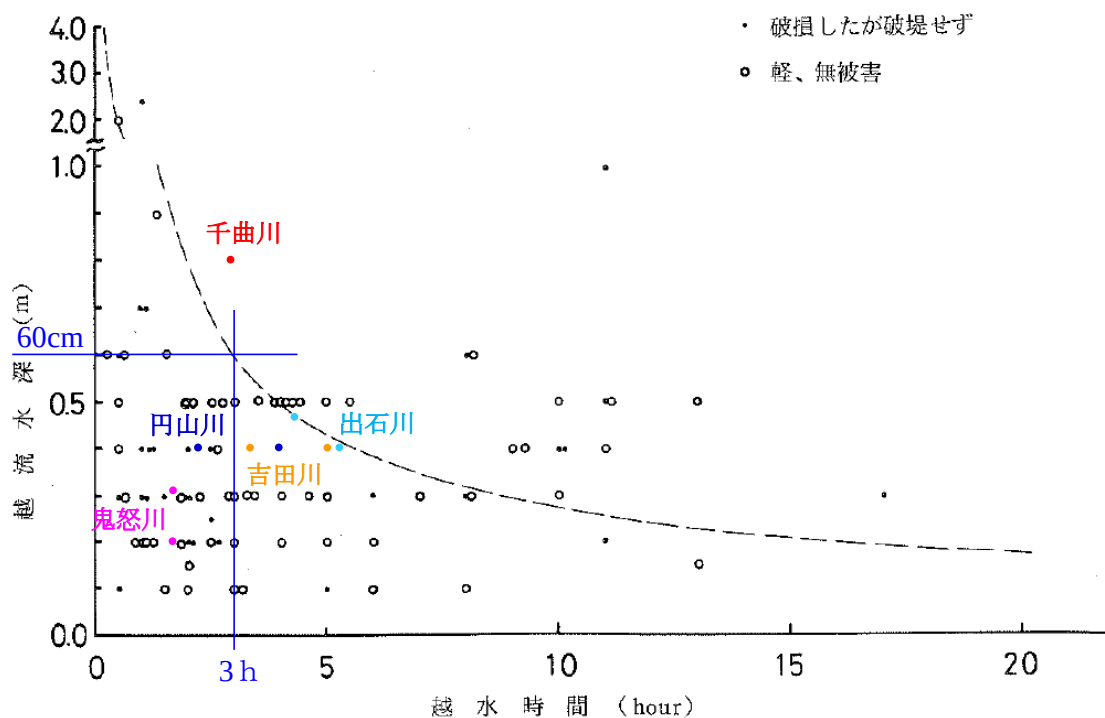


図 20 最大越流水深と越水時間：文献 4 に加筆

なお、図 13 の越流破堤の 5 事例を図 20 に追記してあるが、千曲川以外が破線より下方にあるものの、その意味は「越流水深 60cm で 3 時間持ちこたえる（上記の意味の）総越流量に至る前に破堤している」ことであり、破堤しないはずといったように、破堤を特別に問題視する必要はない。基本的に、図 20 の本来の意味を理解し、取り扱いを誤らないことが必要である。

ここで、仮に、図 20 の越流水深と越流時間の相関において、破堤の有無あるいは可能性を判断できるようにするには、図 21 のような整理が必要である。同図に示すように、基本的な特性として、越流時間が短く、越流深が浅いほど、破堤し難く、非破堤が卓越（発生の可能性が高い）し、越流時間あるいは越流深の増大に伴って、破堤し易く、破堤が卓越すると想定できる。つまり、非破堤が卓越するゾー

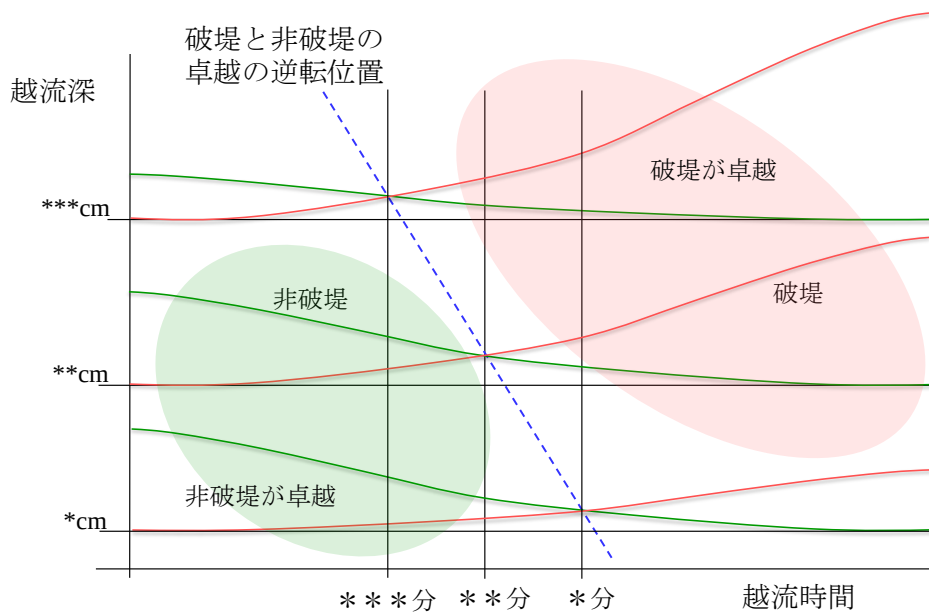


図 21 越流時間～越流深の関係における破堤と非破堤の卓越関係の概念例

ンから破堤が卓越するゾーンへと推移し、非破堤と破堤の卓越が逆転する境界（図では青い破線）がある。注意すべきは、それぞれのゾーンでは破堤と非破堤のいずれも可能性があり、その卓越度が異なるのであり、境界で破堤と非破堤が二分できる訳ではないことである。なお、図で例示した境界の破線は非破堤：破堤の卓越度が 50：50 であるが、非破堤：破堤の割合に応じて境界を設定（例えば、非破堤：破堤＝75：25）すればよく、それが図 21 により性能を評価する評価基準：閾値となる。ただし、図 21 のような相関をとり、閾値を設定するためには、相当かつ相応の非破堤、破堤の実績データが必要であり、その対応が要件となる。

2) 破堤幅、破堤の進行の想定

「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）」¹⁴⁾（以下、マニュアル）では、実測値がない場合、破堤幅、破堤敷高、破堤の時間進行の設定は、下記によることが規定されている。

破堤幅：破堤幅は実績値によることを基本とする。ただし、実績値がない場合は破堤箇所が合流点付近か否かに分けて、次式により川幅 x (m) から破堤幅 y (m) を算定する。

なお、合流点付近とは、合流の影響が無視できない規模の河川が合流している場合で、その目安は支川の川幅が本川の川幅の3割以上とし、影響区間は合流点から上下流に本川川幅の2倍程度の区間を目安とする。

(a) 合流点付近の場合 $y = 2.0 \times (\log_{10} x)^{3.8} + 77$

(b) 合流点付近以外の場合 $y = 1.6 \times (\log_{10} x)^{3.8} + 62$

破堤敷高：堤防は基部まで破堤するものとし、堤防位置における堤内地盤高又は河道高水敷高のいずれか高い方を破堤敷高とする。

破堤の時間進行：破堤後瞬時に最終破堤幅の2分の1 ($y/2$) が破堤し、その後1時間で最終破堤幅まで拡大するものとする。また、この間の破堤幅の拡大速度は一定とし、上下流方向に拡大するものとする。なお、破堤敷高は瞬時に上記の破堤敷高となるものとする。

例えば、鬼怒川の破堤地点（21.0k）では、川幅が約 300m、破堤後瞬時の破堤幅は約 20m、最終破堤

幅は 200m であり、最終破堤幅までの破堤幅の拡大速度は平均で 0.87m/分、拡大時間は 3 時間 27 分が実測値である。これに対して、マニュアルによると、最終破堤幅は $y=1.6 \times (\log_{10} 300)^{3.8} + 62 = 112\text{m}$ となり、実測値の 56% になり、88m 狭い。また、マニュアルによる最終破堤幅までの拡大時間は 1 時間であるが、実測値よりも 2 時間 27 分短い。さらに、マニュアルによる破堤瞬間時の破堤幅は 56m となり、実測値よりも約 36m 大きく、その後の破堤幅の拡大速度は $112\text{m}/2/60 \text{ 分} = 0.93\text{m/分}$ となり、実測値よりも 0.06m/分ほど速く見積られる。

なお、表 4 の瞬時破堤幅が分かっている 4 事例（鬼怒川含む）のいずれも最終破堤幅は、瞬時破堤幅の 4～10 倍であり、マニュアルの 2 倍と比較してかなり大きい。逆に、マニュアルによる 4 事例の瞬時破堤幅は 25～100m となり、10～30m の実績よりも大きい。さらに、破堤の拡大方向の実際は、鬼怒川（写真 5）および吉田川（写真 7）では上下流方向に、千曲川（写真 9、⑧など）では上流方向に卓越している。

上記のように、評価指標の推定では、堤防の置かれた諸条件が複雑・多様であるために、実現象とは異なることがあることに注意し、考慮する必要がある。

2.3 堤防の性能評価の視点に応じた評価指標と評価基準

洪水時の堤防の破堤に関する性能評価のためには、評価指標と評価基準が必要である。

まず、性能評価指標については、表 4 で整理済みであるが、次の 5 指標が考えられる。

- ① 越流破堤の場合の「越流から破堤までの越流継続時間」 *破堤を想定
- ② 浸透破堤の場合の「H.W.L.超過から破堤までの H.W.L.超過継続時間」
- ③ 破堤後の「最終破堤幅」
- ④ 破堤後の「破堤拡大継続時間」
- ⑤ 破堤させない「耐破堤越流時間」 *非破堤を想定

これらの指標は、いずれも破堤前の堤防構造が保有していた「粘り強さの性能指標」と考えることができる。本文では、①および⑤を「耐破堤越流性能」、②を「耐破堤浸透性能」、③および④を「耐破堤拡大性能」と呼ぶことにする。なお、上記の指標の外に、浸水被害の規模に関わる越水後あるいは越水＋破堤後の「浸水継続時間」も考えられる。

本文では、堤防の性能評価の視点に応じた評価指標と評価基準について、表 5 のような考え方を例示する。同表において、A の破堤が前提にあり、かつ A-1 の破堤の発生の対応が通常であるが、本文では、さらに、A-2 の破堤の拡大の対応、さらに、B の破堤させない場合も性能評価の視点として区分している。それぞれの視点は下記に示すが、どの視点により性能評価を行うかは、適宜、判断する。

まず、A-1 の場合は、堤防調査委員会において通常、扱われる視点であるが、評価指標としては、上記の①「越流から破堤までの越流継続時間」あるいは「H.W.L.超過から破堤までの H.W.L.超過継続時間」があり、他方、評価基準は「避難時間」が考えられる。そして、評価指標については、破堤までの時間を延ばす姿勢（方針と同意、以下、同じ）、他方、評価基準については、避難時間を短縮する姿勢の下で対応策を図り、破堤までに避難が終わるように「越流継続時間、H.W.L.超過継続時間 $\geq$ 避難時間」により評価・判断を行う。

また、A-2 の場合は、通常、堤防調査委員会では対象とされていないが、浸水被害の甚大さに直結する破堤拡大についても然るべき対策が必要である。評価指標としては、「破堤幅」あるいは「破堤拡大継続時間」があり、他方、評価基準は「目標破堤幅」あるいは「目標破堤拡大継続時間」を設定することが

表 5 堤防の性能評価の視点に応じた評価指標と評価基準の例

評価要因		A. 破堤が前提にある場合		B. 越流破堤させない場合
		A-1 破堤の発生に対応	A-2 破堤の拡大の対応	
		一般的な粘り強さの実現		
		破堤までに避難させる	破堤の拡大を抑制する	
評価指標		越流開始から破堤までの継続時間	最終破堤幅	耐越流時間
	対応姿勢	破堤までの時間を延ばす	破堤の拡大幅を減ずる（←拡大速度を減ずる）	耐越流時間を延ばす
	対応策	堤防強化*1	堤防強化*1	堤防強化*1
		堤内地構造（舗装など）	裏法先構造（樹林帯など）	堤内地構造（舗装など）
		水防活動（諸対策*2）	水防活動（諸対策*3）	水防活動（諸対策*2）
評価基準		避難時間	最終破堤幅＝瞬時破堤幅の2倍*4	越水時間
	対応姿勢	避難時間を短縮する	－	越水時間を短縮する
	対応策	情報提供・タイムライン・避難誘導	－	嵩上げ（構造設計）
		避難施設の整備	－	嵩上げ（水防活動）
評価・判断		破堤までの時間 ≧ 避難時間	破堤拡大幅 ≦ 瞬時破堤幅	耐越流時間 ≧ 越水時間
課題		破堤までの越流下の安全・速やかな避難	破堤後の浸水に対する安全・速やかな避難	越流下の安全・速やかな避難
		*1：天端・裏法・裏法尻・基礎地盤の強化／構造改変（断面拡幅・緩傾斜・一枚のりなど）		
		*2：侵食・漏水・亀裂・崩壊の防止	*3：破堤断面の侵食・崩壊の防止	
		*4：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）に準ずる		

必要になる。そして、評価指標については、望ましい目標破堤幅あるいは目標破堤拡大継続時間を設定する姿勢の下で対応を図り、可能な限り破堤幅あるいは破堤拡大継続時間を減じて、「破堤幅 ≤ 目標破堤幅」あるいは「破堤拡大継続時間 ≤ 目標破堤拡大継続時間」により評価・判断を行う。

さらに、B の場合は、特に、越流破堤について、天端高を保持し、堤防の基本構造を防護することで破堤はさせないことを旨としており、通常考えられている「粘り強さ」とは異なるが、損傷しても致命的な破堤はさせないことが基本的に望まれる。評価指標としては、堤防構造が保持する「耐破堤越流時間」があり、他方、評価基準は「天端高超過水位継続時間」が考えられる。そして、評価指標については、天端高超過水位継続時間以上に延ばす姿勢、評価基準については、越水時間を短縮する姿勢の下で対応を図り、堤防構造が越流時間内は耐える「耐破堤越流時間 ≥ 天端高超過水位継続時間」により評価・判断を行う。

また、上記の性能評価による判断が下されるように諸対応策が取られることになるが、A-1 では、堤防強化、堤内地構造の工夫、水防活動あるいは避難誘導など、A-2 では、堤防強化、裏法先構造の工夫、水防活動など、さらに、B では、堤防強化、堤内地構造の工夫、水防活動、避難誘導あるいは堤防の嵩上げ（構造設計、水防活動）などが考えられる。

なお、表 5 の最下段の課題では、越流あるいは越流による破堤による浸水を想定しているので、破堤の有無、破堤拡大の有無に拘わらず、越流による浸水に対しては、安全・速やかな避難が大前提である。

参考文献

- 14) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室・国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）、平成27年7月。

3. 危機管理型ハード対策を上回る効果を有する粘り強い河川堤防への動き

「令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討」では、令和元年台風第 19 号の洪水で発生した全国の 142 箇所の堤防決壊を受けて、令和 2 年 2 月に設置された「令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会」の活動および同年 8 月に取りまとめた報告書¹⁵⁾を出している。

そして、上記の報告書を受けて、今後の本格的な河川堤防の強化対策の実施に向けた検討につなげるためとし、越水に対して減災効果を発揮する「粘り強い河川堤防」の技術開発に必要な技術的検討を目的として、国土交通省水管理・国土保全局は、令和 4（2022）年 5 月に「河川堤防の強化に関する技術検討会」（以下、技術検討会）を設置している¹⁶⁾。

この技術検討会は、越水に対して「粘り強い河川堤防」の技術は、現時点では、強化対策の効果や幅に不確実性があるため、現段階で必要となる性能を評価し、設計できる段階に至っていないことから、「粘り強い河川堤防」工法の公募、パイロット施工や大型の水理模型実験等による確認も行いながら、対策工法の検証を行い、技術開発を進める、また、対策工法の評価を踏まえて、本格的な河川堤防の強化対策の実施に向けた検討につなげる・・・とされている。

本章では、技術検討会により新たに提起された、“越水に対する性能”の付加の概要および「越水に対する危機管理型ハード対策」を上回る効果を有する「粘り強い河川堤防」の取組み事例として、佐賀県の嘉瀬川でのパイロット事業を参照する。

3.1 堤防の越水に対する性能の付加

上記の技術検討会において、今後（令和 4 年 5 月時点）具体的な検討が進められることになるが、その前提となる「粘り強い河川堤防」の要求性能の数値目標（後出、図 25）が、上記の検討会により明示されたことは画期的であり、それによる性能検証の進展が待たれる。なお、技術公募などの具体的活動の推移により、特に詳細事項は臨機に変わる可能性はあるが、令和 4 年 5 月時点において、性能評価に関わると思われる事項は、参考文献 16 の検討事項から適宜、引用すると、下記の通りである。なお、引用した図の表題は、検討会資料に基づいて著者が適宜、付したものである。

1) 河川堤防に求められる機能

「堤防とは、流水が河川外に流出することを防止するために設ける施設であり、護岸、水制、その他これらに類する施設と一体として、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とする。」とされている。

そして、越水に対して「粘り強い河川堤防」の実現に当たっては、

① 既存の堤防の性能を毀損しないこと

② 越水した場合でも、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」）を付加すること

が明示され、これらの 2 つの性能を実現するため、対策工法の構造検討・施工および維持管理等の観点から技術開発を進めるとされている。つまり、図 22 で説明されるように、従来の①の性能は基本として、②の「越水に対する性能」が新たに付加されたことが特筆される。

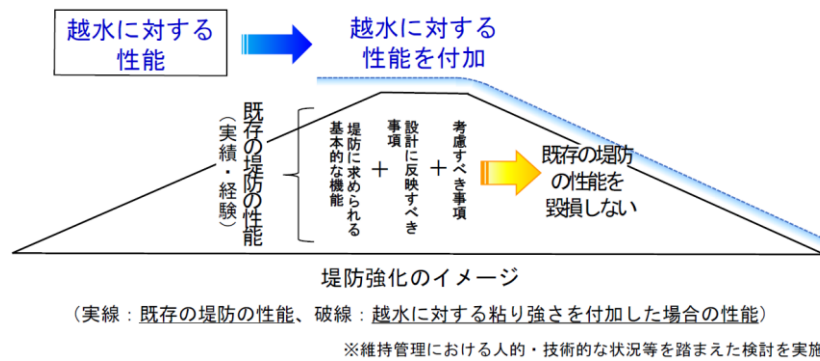


図 22 越水に対する粘り強い河川堤防の性能¹⁶⁾ [著者解釈：図の実線は堤防形状、水色の破線は越水面で表示]

2) 技術開発の対象とする構造

越水に対して「粘り強い河川堤防」の技術開発の対象とする構造は、次の①～③の3種類が想定されている。なお、それぞれに付した*は、著者による補足である。

- ① 表面被覆型（断面拡大型も含む）：計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対する堤防機能は、土堤により確保する。土堤表面にシートやコンクリートブロックを設置することにより越水に対する性能を発揮する。*越水に関わる堤防の部位は、天端、裏法面、裏法堤脚があり、被覆方法には、シート、コンクリートブロック以外にも多様な技術・工法がある。
- ② 自立型（自立式特殊堤を含む）：盛土の部分がなくとも自立部が自立する構造で、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対する堤防機能および越水に対する性能を発揮するもの。堤防に求められる基本的な機能や設計に反映すべき事項、考慮すべき事項への対応は自立式特殊堤の確認方法と同じと考えられる。*自立式特殊堤は、既存の技術・工法である。
- ③ その他構造：コア部分のみでは自立はしないが、周辺の盛土（堤防）との複合体として、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対する堤防機能および越水に対する性能を発揮するものなどが想定される。現状では、基本的な性能や設計に反映すべき事項、考慮すべき事項への照査方法の規定がない。*従来には無い構造であり、新たに提案される技術・工法も対象にしている。

特に、表面被覆型と自立型のイメージは、図 23 のように例示されているが、その他構造のイメージは、特には示されていない。

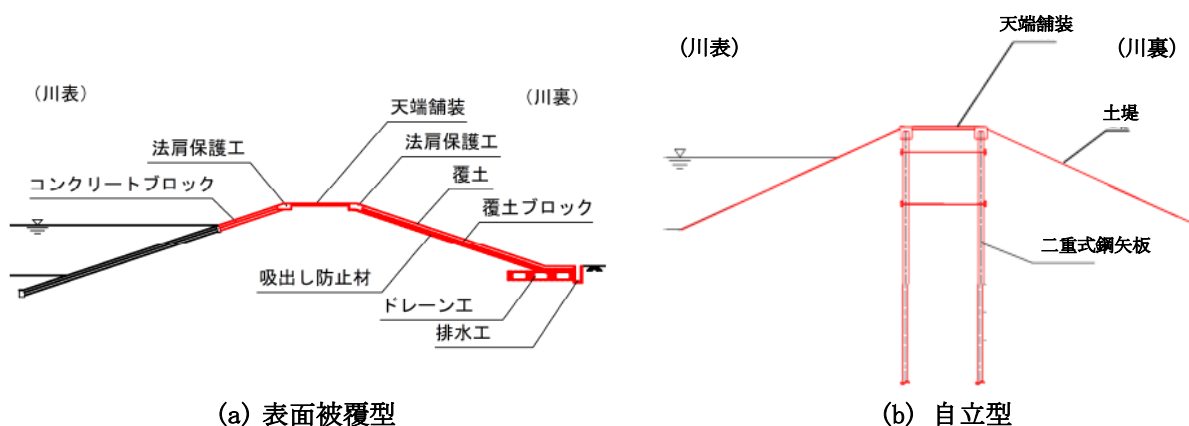


図 23 越水に対して「粘り強い河川堤防」の技術開発対象の構造¹⁶⁾ [(b)図はフォントを著者拡大加筆]

3) 技術開発目標の基本的考え方

越水に対して「粘り強い河川堤防」の技術開発のために、技術開発目標の設定が必要とされ、それは全国各地の堤防に生じやすい越水状態を想定するとともに、過去の越水による被災状況やその外力による堤防裏法面等へのせん断力等の力学的特性などに基づいて検討するとされている。

また、技術開発目標として想定する外力の種類は図 24 で示されているが、越水に対する性能を評価するため、「越水時に堤体に働く外力」の観点から、「越流水深」と「越流時間」が特に重要とされている。これらは越水に対する性能評価のための評価項目であり、新たに 2 項目が設定されたことになる。

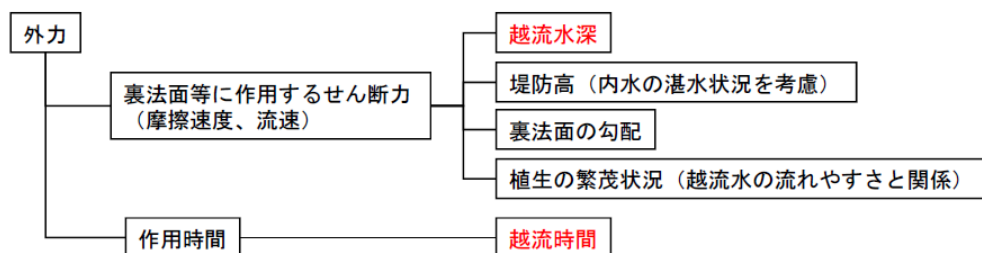


図 24 技術開発目標として想定する外力の種類：性能の評価項目¹⁶⁾

4) 技術開発目標（評価の目安）の設定

近年の越水事例における越流水深や越流時間、近年の越水事例の堤防の被災状況、避難に係る時間の研究、過去の越水に対する堤防強化の検討における越流水深・越流時間の研究などを踏まえて、技術開発目標（評価の目安）は、「越流水深 30cm の外力に対して、越流時間 3 時間」が設定され、その間（3 時間）は越水に対する性能を維持する堤防構造とするとされている（図 25 参照）。

この数値目標において、図 24 で示される評価項目の「越流水深」と「越流時間」は評価指標であり、「越流水深 30cm・越流時間 3 時間」は検討対象とする技術・工法の妥当性検証の評価基準になる。

なお、技術開発目標以上の越水に対する性能の技術開発を妨げるものではなく、上記の技術開発目標による技術開発状況および技術開発目標以上の技術提案等も踏まえつつ、引き続き知見の集積を進めるとされている。

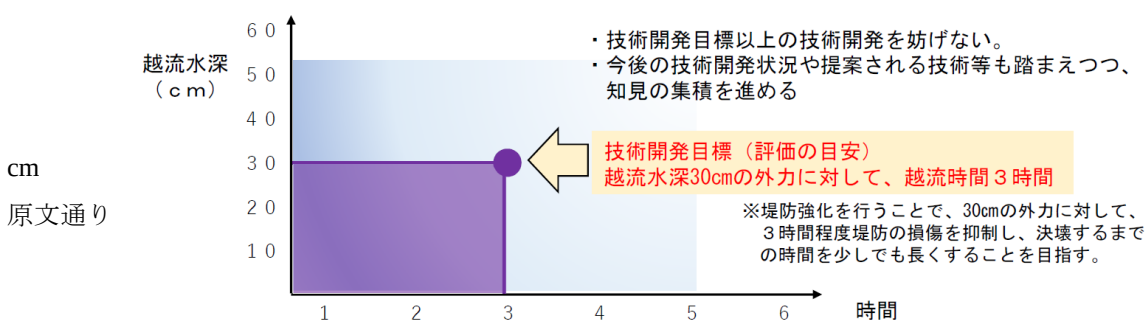


図 25 技術開発目標（評価の目安）：性能の評価基準¹⁶⁾

5) 越水に対する性能を維持している状態の想定

技術開発目標（評価の目安）の外力に対して、堤防天端高さの維持を目標に、その状態を技術的に一定程度評価できる堤防の状態を想定する必要があるとして、次の①、② が想定されている。

- ① 表面被覆材の飛散等により越流水が堤体土に直接作用する状態を避けることが重要。

② 堤体が表面被覆材によって被覆された状態がほぼ維持され、その結果堤防天端高さが維持されている状態。

ここで、① は要求性能の「既存の堤防の性能（安定性等）を毀損しないこと」に、② は技術開発目標の「越流時間 3 時間は越水に対する性能を維持する堤防構造とする」に関係していると言える。

6) 技術提案で求める性能および事項

越水に対して「粘り強い河川堤防」を実現するため、表面被覆型、自立型、その他構造のいずれについても、構造の検討上、求められる性能は、次の①、② とされている。

① 既存の堤防の性能（安定性等）を毀損しないこと。

- ・ 堤防に求められる基本的な機能
- ・ 設計に反映すべき事項
- ・ 設計に当って考慮すべき事項

② 越水に対する性能を有すること

- ・ 越水した場合であっても、決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くする

上記の① の基本的な機能、反映すべき事項および考慮すべき事項は、河川砂防技術基準¹⁷⁾に規定されているが、詳細は表6～表8の求める事項と同じである。

さらに、上記の ① および ② で掲げる性能について、例えば、表面被覆型を参照すると、開発技術に求められている事項（案）（令和4年5月時点）は、基本的な機能は表6、反映すべき事項は表7、考慮すべき事項は表8、さらに、越水に対する性能は表9 により具体的に示されている。

従って、技術・工法の応募に際しては、これらの求める事項の該当項目が評価の対象になるので、それぞれに対して提案し、根拠・エビデンスを示すことが必要になると思われる。

表 6 開発技術に求める事項：基本的な機能¹⁶⁾

求める事項	表面被覆型
常時の健全性	・ すべりに対する安全性 ・ 周辺地盤の引き込み沈下に対する安全性 ・ 堤防の高さの確保 ・ 雨水排水の集中を避ける天端及び法面形状の維持
耐侵食性能（洪水時）	・ 直接侵食に対する安全性 ・ 側方侵食に対する安全性 ・ 洗掘に対する安全性
耐浸透性能（洪水時）	・ すべりに対する安全性 ・ パイピングに対する安全性
耐震性能（地震時）	・ レベル2地震動による沈下後の堤防高さ
波浪等に対する安全性	・ 計画高潮位・波浪・津波に関する堤体の侵食に対する安全性 ・ 波浪による越波に対する安全性

表 7 開発技術に求める事項：反映すべき事項¹⁶⁾

求める事項	表面被覆型
不同沈下に対する修復の容易性	・ 不同沈下が生じた場合にそれを確認でき、速やかな修復が容易な構造であること
堤体と基礎地盤との一体性及びなじみ	・ 土堤の有する堤体と基礎地盤との一体性及びなじみを毀損しないこと
嵩上げ及び拡幅等の機能増強の容易性	・ 機能増強が容易な構造であること
損傷した場合の復旧の容易性	・ 損傷した場合に迅速な修復が可能な構造であること
基礎地盤及び堤体の構造及び性状にかかる調査精度に起因する不確実性	・ 既存の堤防断面（計画堤防断面）を大きく毀損しない構造であること。
基礎地盤及び堤体の不均質性に起因する不確実性	

表 8 開発技術に求める事項：考慮すべき事項¹⁶⁾

求める事項	表面被覆型	自立型
環境及び景観との調和	・ 環境及び景観と調和する構造であること (例えば、緑化、意匠等の工夫、環境への影響(欠損した場合含む)等)	
構造物の耐久性	・ 耐久性を有する構造であること (例えば、材料の十分な耐用年数の確保、部材の補修や更新が容易である構造等)	
維持管理の容易性	・ 必要な点検と補修が容易な構造であること (例えば、目視可能な箇所については点検・補修が容易、不可視箇所については十分な安全性・耐久性を持つ構造等)	
施工性	・ 一般的に施工可能な構造であること (例えば、特殊な機器、特殊技能の必要性等)	
事業実施による地域への影響	・ 事業実施による地域への影響を考慮した構造であること (例えば、用地取得の必要性、地盤沈下、地下水阻害の可能性等)	
経済性	・ ライフサイクルコストを含めた経済性を考慮した構造であること (例えば、施工時のコスト(材料費、施工費)に加え、長期間機能を維持するための点検、部材の補修・更新等も含めた維持管理コスト等)	
公衆の利用	・ 公衆の利用に配慮した構造であること	

表 9 開発技術に求める事項：越水に対する性能¹⁶⁾

・ 実験もしくは解析等によって、技術開発目標を満足する構造であることの根拠に関する情報。(例えば、実験条件・実験結果、解析方法・解析結果、信頼性に関する情報等。) ・ 決壊に至るまでのプロセス(変状連鎖図等)や時間などの情報。 (越水に対する性能を確保できなかった場合の条件やその要因も含む) ・ 適用条件に関する情報(理由も含む)。 (例えば、砂質土の堤体には適用できない、軟弱地盤には適用できないなど) ・ 耐久性、施工性、維持管理等の情報は、考慮すべき事項で求める。 ・ 越水に対する性能をより高めるための施工上の留意点。 ・ 越水に対する性能を長期間維持するための維持管理上の留意点。

7) 「粘り強い河川堤防」の性能の評価方法

技術提案に対する評価の基本的な考え方は、次の ① および ② の 2 点が示されている。

- ① 技術提案における越水に対して「粘り強い河川堤防」の性能証明のため、「i) 既存の堤防の性能(安定性等)を毀損しないこと(基本的な機能、設計に反映すべき事項、考慮すべき事項)」および「ii) 越水に対する性能を有すること」にかかる全ての事項について、技術提案を求める。
- ② 提案された事項の評価は、全ての事項を基本に実施することを想定している。

つまり、① では開発技術に求める事項(案)(令和 4 年 5 月時点)の全てについて技術提案が求められており、② では提案事項は全て実施(実行)することが想定されている。

なお、評価方法が例示されているが、下記の参考が示され、土堤における照査手法(河川砂防技術基準)、各種指針・マニュアルに基づく構造物の設計方法の援用、模型実験や解析による性能の確認等が想定されている。

参考：表面被覆型—河川砂防技術基準、自立型—道路土工指針(擁壁工指針)等

* 技術提案において、評価方法を求める場合もある。

これらの評価方法は、根拠・エビデンスの分類に関係しており、求められる事項のそれぞれについて根拠・エビデンスが必要とされるが、今後の検討の進展において、より具体化されていくと思われる。

8) 技術提案に基づく評価などの流れ

今後(2024 年度が想定される)の本格的な河川堤防の強化対策の実施に向けた、上記の要求性能、技

術開発目標、性能評価方法などの検討による技術開発の流れは、下記の①～④のように示されている。

- ① 各工法の越水に対する性能の評価を行うため、「評価の目安」として、技術開発目標を設定。
- ② 既存の堤防の性能を毀損しないことの確認。
- ③ 技術開発目標を踏まえた、水理模型実験や解析等による越水に対する性能の確認。
- ④ 越水に対する性能等が一定程度確認された工法について、小規模試験施工・パイロット施工等を実施し、堤防の基本的な機能や施工法、維持管理などを確認。

なお、パイロット施工等の実施の位置付け、パイロット施工の実施箇所でのモニタリング、さらに、それらの結果に基づいた、強化対策の実施のための技術・工法のカatalog化、点検・評価要領への反映などについては、図 26 が示されているが、特に、構造物の安定性を長期的に維持するためのモニタリングについては、下記が示されている。

- ・越水に対して「粘り強い河川堤防」の性能を維持するため、パイロット施工等を実施した箇所で行うモニタリング項目を検討。
- ・モニタリング項目は、越水に対する性能の維持のため、既往の実験結果等から変状連鎖図を整理し、モニタリングすべき平時の事象を想定（モニタリング項目を設定）。
- ・モニタリングは、パイロット施工箇所等において、施工後から当面 3 年間程度を目処に実施。

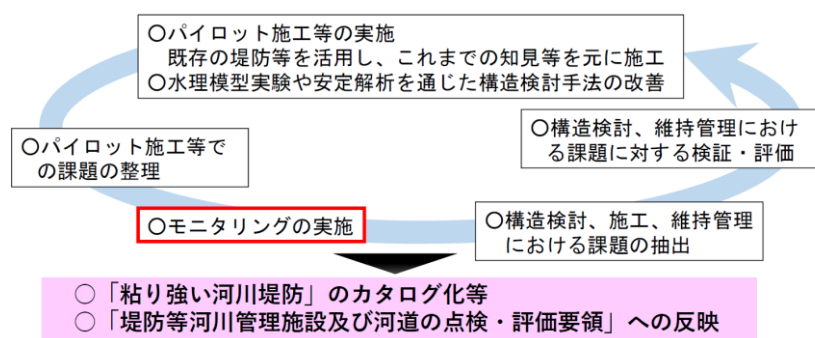


図 26 パイロット施工のモニタリングと成果の反映・活用¹⁶⁾

以上は、令和 4（2022）年 5 月時点の政策的な動きであるが、その後、越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」の公募のため、令和 4 年 12 月 22 日に公募要領（素案）に対する意見募集¹⁸⁾が行なわれ、その結果を踏まえて、令和 5 年 3 月 10 日に技術公募が開始¹⁹⁾された。その後、令和 5 年 4 月の応募のエントリー、同 9 月の技術応募の 2 段階の手続きを経て、技術評価、Catalogの作成などが実施されており、第 1 回公募の評価結果は令和 6（2024）年春頃に公表されると思われる。

参考文献

- 15) 国土交通省水管理・国土保全局：令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書、令和 2 年 8 月。
- 16) 国土交通省水管理・国土保全局：河川堤防の強化に関する技術検討会、開催主旨、資料 2 検討事項、令和 4 年 5 月 20 日。
- 17) 国土交通省：河川砂防技術基準 設計編、平成 9 年 5 月。令和元年 7 月、令和 3 年 4 月、10 月一部改定。
- 18) 国土交通省水管理・国土保全局 治水課：『越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」の公募要領（素案）』に対する意見募集を行います、Press Release、令和 4 年 12 月 22 日。
- 19) （一財）国土技術研究センター：越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」の公募要領、令和 5 年 3 月 10 日。

3.2 粘り強い河川堤防の実際：嘉瀬川のパイロット事業

3.1 の通り、「令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会」の報告書（令和 2 年 8 月）では、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨を受けて提起され、事業化されていた「越水に対する危機管理型ハード対策」を上回る効果を有する「粘り強い河川堤防」を目指すとしている。その具体的な取組みとして、例えば、佐賀県の一級河川の嘉瀬川（流域面積 368km²、幹川流路延長 57km）では、「構造上の工夫」により越水に対して河川堤防を強化するパイロット施工が実施（令和 3 年 10 月～令和 4 年 3 月）²⁰⁾されている。

本事業は、堤防の天端、法面、堤脚の各部位が堤防を構成する部材とすると、本例はそれらの部材を一体的に捉え、評価して、堤防全体としての粘り強さを志向しているが、これは、文献 21 の「部材間複合構造最適」による「全体最適」に相当している。

本事例²⁰⁾から、「部材間複合構造最適」の具体的方法、さらに、対策工法を選定した根拠・エビデンスの提示方法に着目すると、概要、特徴は下記の通りである。

（1）対象区間

粘り強い河川堤防の整備の対象区間は、氾濫リスクの高い橋梁部、湾曲部の影響区間を抽出するとされ、本施工区間は他区間よりも先に越水する可能性が高く、后背地の資産等に関わる被害ポテンシャルも高いことから、長崎本線から上流の左岸の延長 1.4km がパイロット施工区間として設定されている（図 27）。

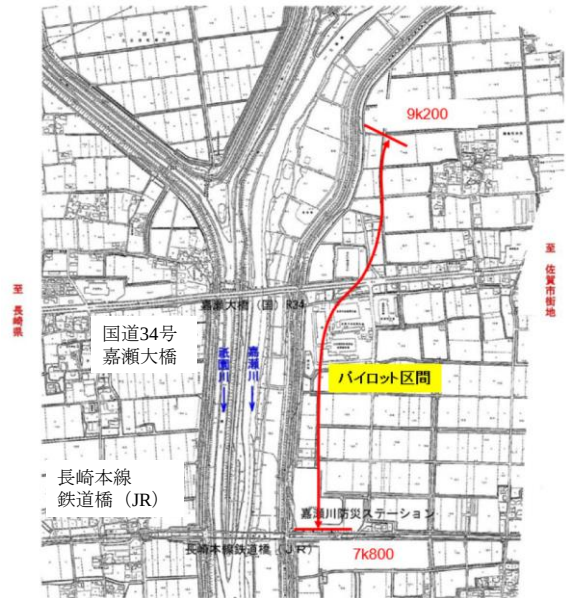


図 27 パイロット施工箇所²⁰⁾

（2）対策工法の選定

対策工法は、適用流速および当該堤防の利活用などを踏まえて選定されている。対策工の標準断面図は図 28 とされ、「構造上の工夫」の対象は川表法覆工、川裏法覆工、川裏法尻保護工、路肩保護工、天端舗装、川表法尻洗掘防止工であり、堤防の全体系を構成する部位と言える。各部位の工法選定の理由は下記とされるが、本書では、越水に関わる 1) 天端舗装、2) 路肩保護工、3) 川裏法覆工、4) 川裏法尻保護工を中心として、公表されている報告²⁰⁾および関連資料^{22)~24)}を参照して、適宜、抜粋して示す²¹⁾。

1) 天端舗装

越水時の「ひさし効果」の発現のために舗装が必要とされており、堤防法線の見直し、路盤厚の不足、舗装の劣化などの状況を踏まえて、現況舗装は全てがやり替えとされている。

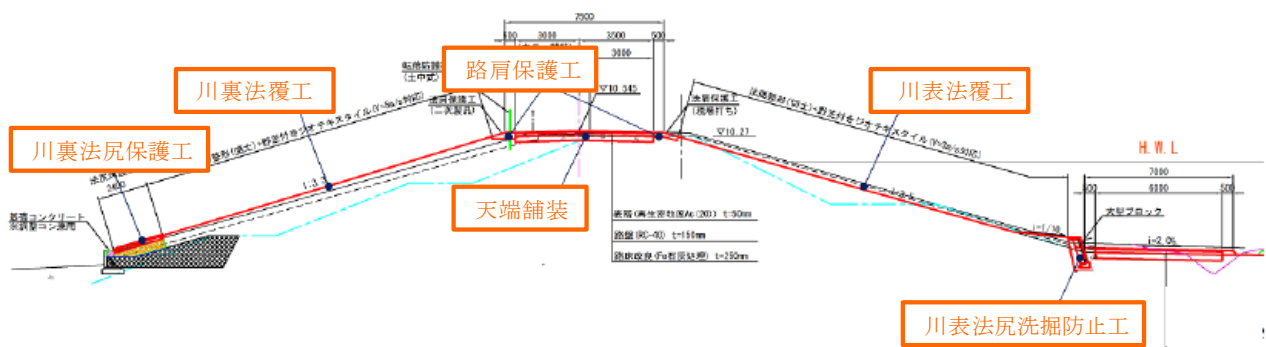


図 28 堤防の 6 部位の対策工の標準断面図：文献 20 に加筆

2) 路肩保護工

越流による法肩からの崩壊を防ぐため、川表と川裏ともに路肩保護工ブロックを設置し、舗装面や法面と段差が生じないように保護されている（写真 10）。



写真 10 川裏側の法肩部の構造：文献 24 に加筆

3) 川裏法覆工

越流水が流下する川裏側の法覆工に関しては、法勾配や越流流速などの現場条件に基づく堤防の代表断面（比高：7.17m）において、越流条件（越流水深 0.3m、法肩水深 0.2m）により算定された、等流水深 0.07m および等流流速 3.77m/s に基づいて、裏法の現場条件（法勾配 1：3.1～3.2、越流流速 3.8m/s）が設定されている。ここで、現場条件の設定は、水理モデル・シミュレーション手法による計算結果によるが、法面覆工の設計条件の根拠・エビデンスの一方法と言える。

堤防表面の被覆²²⁾は、施工性の良いシート系（川表：不織布付きジオテキスタイル、川裏：野芝付きジオテキスタイル）が採用され、所要の耐流速性（表法：3m/s、裏法：5m/s）により耐侵食性が確認されている。ここで、野芝付きジオテキスタイルの耐流速（5m/s）は水路模型実験により検証されている。

なお、野芝付きジオテキスタイルは、越流対策仕様として改良されており、不織布（幅 0.9m、長さ 3.0m）、グリッドネット（幅 1.05m、長さ 3.0m、グリッド間隔 8mm）および野芝（幅 0.9m、長さ 2.9m）の 3 層による一体化構造とされている。製作ヤードにおいて、黒ボク土壤に不織布とグリッドネットを敷設し、切り芝を張り、育成された野芝付きジオテキスタイルは、いわゆる、品質管理されたプレキャスト製品とも言えるが、現地に搬入、敷設されて、専用のネット接続ピンと固定ピンにより堤体に抑えられる。特に、法肩と法尻の保護工と法面の境界部（写真 10 参照）は、越流対策仕様として、ずれ防止をしたネットを重ねて（幅約 1m）補強され、浮き上がり防止が施されている。なお、法面での敷設後、野芝の成長により堤体との一体化が促進され、所要の耐越流性が図られると言える。

ここで、野芝付きジオテキスタイルの性能評価は、メーカーによる耐流速に関する水路（幅 0.3m・高さ 0.3m・延長 3m）実験およびグリッドネットの引張強度試験のデータに拠っているが、これらの実験、試験は製品の根拠・エビデンスの一方法と言える。なお、裏法用の越流対策仕様の基礎となった、表法用のシート系は NETIS 掲載期間終了技術（CG-040015-V）であるが、活用効果評価により平成 26（2014）年度推奨技術に指定されており²¹⁾、今次の越水に対する裏法の粘り強い堤防構造への展開に繋がっていると言える。

4) 川裏法尻保護工

越流水による侵食作用は法尻部で最も大きくなるとされ、法尻部はコンクリートブロック張で保護しているが、設置範囲は従来の危機管理型ハード対策（図 29）に準じて 2m 以上とされている。また、法面の緩傾斜化（1：3.1～3.2）により法尻で平場が確保できず、越流水がブロック高の 60～70cm を流下するため、流水の減勢性、ブロック下のドレーンの通水性の確保のために、下記の要領①～⑦ による法尻保護工が計画されている（図 30）が、これらは「構造上の工夫」と言える。

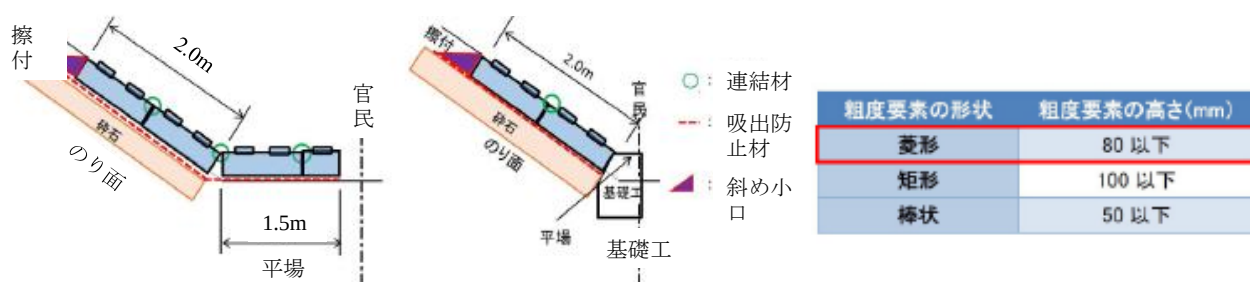


図 29 従来の危機管理型ハード対策における法尻ブロック：文献 20 に加筆

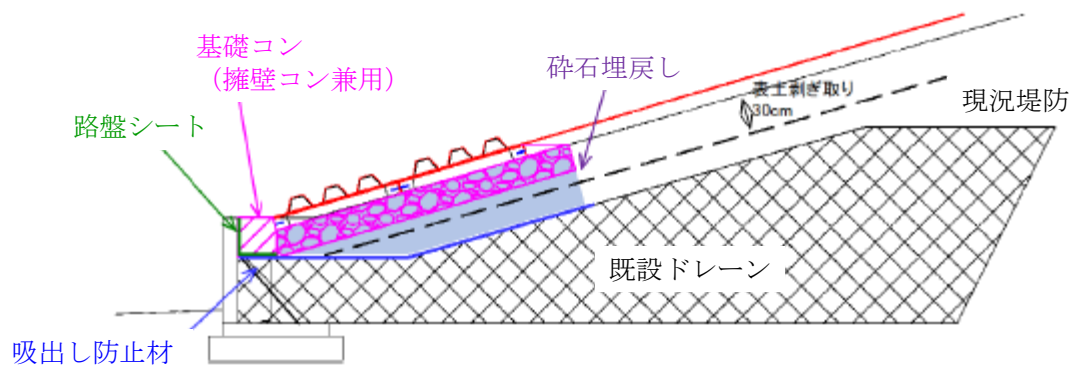


図 30 川裏法面保護工の基本方針²⁰⁾

- ① 越流水に対して安定するブロックを用いる（必要重量、連結金具付き）。
- ② 減勢効果のあるブロックを用いる（突起の高さ、図 29：菱形・80mm 以下を採用）。
- ③ ブロックは、透水性が高く、明度の低いポーラス製とする。
- ④ 既設ドレーンとブロックの間は、全て砕石埋め戻しとする。
- ⑤ 法尻ブロック下端のドレーン露出部には、吸出防止材を重ねる（既設吸出防止材の損傷防止）。
- ⑥ 法尻ブロック下端は、調整コンの役割もあるため、基礎コンタイプとする。
- ⑦ 既設ドレーン上での基礎コン打設となるため路盤シートを敷く。

ここで、上記の①のブロックの必要重量は、メーカーによる 1/6 スケールの水理模型実験²³⁾に拠るとされている。図 31 は、想定される流水によるブロックのめくれと滑動の変状例およびブロックの破壊（変状発生）時の越流水深と流速の結果である。同結果により、現場条件より厳しい法面勾配 1：2 でも 300kg/m² 以上であれば流速 6.9m/s まで耐えられることから、現場条件（法勾配 1：3.1～3.2、越流流速 3.8m/s）では、十分に安定すると判断されている。

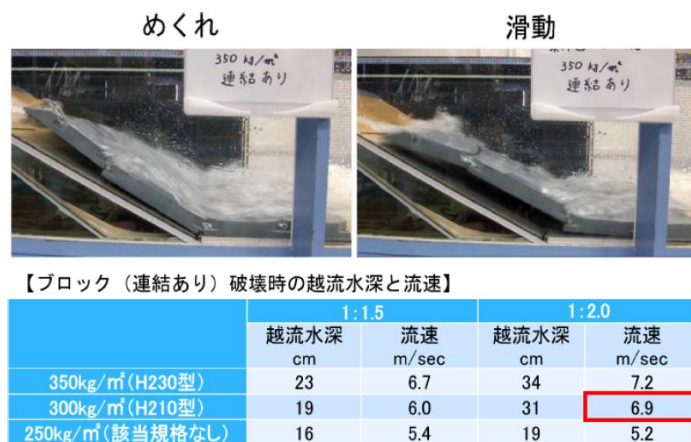


図 31 水理模型実験結果²⁰⁾

ここで、水理模型実験²³⁾では、模型水路（幅 40cm・高さ 40cm・延長 10m）内に、堤防模擬模型（高さ 28cm・幅 40cm・天端幅 17cm：裏法勾配 1:1.5、1:2.0：吸出し防止材を張付けた板状法面）を設置し、堤脚部の法面と法先の平場にブロック模型（実質量 250kg/m²、300kg/m²、350kg/m²：連結の有無）が置かれている。堤防模擬の越流水深は 1.7～6.7cm（実スケール 10cm～40cm：任意）とされ、縮尺比率 1/6、流速比率 $1/\sqrt{6}$ により、実験時の径深からマニング式に基づき流速が推定されている。なお、ブロック模型は、単位容積質量を実物と同じにして寸法比をもとに作製されている。

このように、1/6 スケールの小型模型に対する水理模型実験により得られた耐流速に基づいた、剥離・滑動に対して安定なブロック質量の検証は、所要のブロックの採用の根拠・エビデンスと言える。

（３）現場通水試験

完成直後（３月）の堤防に対して越流を模擬した現場通水試験（３ ケース）が実施され、法肩および法尻の保護工ブロック、野芝付きジオテキスタイルの挙動、変状などが確認されている（写真 11）²⁰⁾。

ケース 1：法全長（16m）に誘導水路（幅 0.5m）を設置し、導水路内を法肩から法尻に流水を流下

ケース 2：法面の上半分（8m）に導水路（幅 0.5m）を設置し、法面下半分で流水は広がって流下

ケース 3：法面に導水路を設けず、水槽のせきの幅（2.5m）から流れ出す流水は広がって流下

流水作用は、排水ポンプ車により天端に架設した水槽（2m×2.5m×H0.9m）に給水し、流量せき（四角せき）より路肩に排水（設計流速 3.8m/s の再現、排水量 0.432m³/s）し、法面を流下させ、法先にある水路で貯水し、４ 台のポンプで水槽に戻して循環している。流水条件の計測結果は、ケース 1：水深（法肩 7～8cm、法面 8～10cm、法尻 8～10cm）・流速計流速 3.6m/s、ケース 2：水深（同 7～8cm、同 8～10cm、同・計測不能）・同 3.48m/s、ケース 3：水深・流速計流速／計測不能とされている²⁴⁾。



(a) 法肩通水状況：ケース 3



(b) 法尻通水状況：ケース 3、注）芝は冬枯れの状態

写真 11 現場通水試験の状況例：文献 20 に加筆

現場通水試験では、法面の代表箇所の侵食状況、接続部（法肩保護工ブロック、法尻保護工ブロックと野芝付きジオテキスタイル法面）の変状、ブロックの挙動、法尻部の跳水状況などが、計測あるいは観察されているが、次の 1)～3) の結果（著者が適宜、要約。＊は著者が付記）が示されている。

- 1) ３ ケースの試験では、いずれも接続部の変状が見られず、グリッドネットの二重重ね構造による裏法面の補強は、ジオテキスタイル自体の損傷、端部からのめくれ、土羽の侵食などを抑え、十分に機能している。

＊部位間の弱部である境界部の強化、連続性の確保

- 2) 法尻ブロックの上端には斜め小口を設置していないが、接続部の構造の工夫により洗掘は発生していない。

＊小口を代替できる構造の実現

- 3) 法面の中間部分では、僅かにジオテキスタイルの背面土砂（砂質土の細粒分）が浸透水によ

り流れ出て、横断方向の接続部での堆積が確認されているが、ネットピン連結部での侵食は抑えられている。

＊芝が冬枯れし、侵食抑制機能は不十分な状態での効果

上記の現場通水試験は、新たな越流対策仕様である野芝付ジオテキスタイルおよび「部材間複合構造」である、法肩保護ブロック、法尻保護ブロックとの一体化、最適構造化による有効性を検証しており、制約（越流時間、越流水深など）はあるが、採用工法の妥当性の根拠・エビデンスの一方法と言える。

なお、今後の野芝の活着、成長などによる被覆効果の向上確認、仮にも越水が発生した場合の動態観測などのフォローアップ調査が必要、かつ有効と思われる。

本事例は、天端補強と法尻補強を対象とした従来の危機管理型ハード対策から、裏法面の補強にも展開している点が特筆されるが、本文、3.1の「河川堤防の強化に関する技術検討会」により、技術開発の対象とする構造の一つとして分類名称が具体的に明示された「表面被覆型」を先取りしている事業と言える。また、本事例で提示された天端～裏法～裏堤脚を一体化した工法の提案は、検討会の公募要領（素案）²⁵⁾で求められている『パッケージ』技術に相当していると言える。

なお、本例の「部材間複合構造最適」の視点から、越流に対する機能が期待できる部位として、裏法先で連続する道路の舗装および水路がある〔写真12、文献20〕。いずれも当該堤防では付帯している地域性ではあるが、道路舗装は越流水による裏法先の基礎地盤の侵食あるいは破堤の抑制・防止、水路（類似構造：落堀、本文、4.1参照）は越流水の減勢に資することが期待できるので、有効な減勢機能部位であることを意識するとよい。



写真12 パイロット施工直後の堤防：文献20に加筆

参考文献

- 20) 江口紅覇・下村幸一・緒方哲郎・興梠逸郎：嘉瀬川の粘り強い河川堤防整備におけるパイロット施工について、令和4年度九州国土交通研究会、I部門、No.3、2022.7.
- 21) 常田賢一：防災・減災、国土強靱化のための性能評価の最適化の実務-個別最適から全体最適への展開-、（一社）地域国土強靱化研究所、2023.3.
- 22) 日本植生（株）のカタログによる <http://www.nihon-shokusei.co.jp> 2022.11.3 閲覧.
- 23) テトラック法尻ブロックの対応流速と越流水深について、P.E.C.協会 <http://www.all-pec.org> 2022.11.3 閲覧.
- 24) （株）山崎建設・富士建設・日本植生（株）：現場水路試験に関する試験報告書、令和4年3月28日.
- 25) 国土交通省水管理・国土保全局 治水課：『越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」の公募要領（素案）』に対する意見募集を行います、Press Release、令和4年12月22日.

4. 今後、必要な取組み課題

本文の第1章に関わる、堤防の破堤などに関わる堤防調査委員会では、破堤の原因と対策が主たる検討事項とされているのが実情である。しかし、第1章の破堤現象および第2章の破堤特性などによれば、被害の拡大、規模に「落堀」および「破堤拡大」が、深く関わる事が推察できる。これらは、現時点では、特別には意識されていない事項であるが、本章では、「落堀（おちぼり、おっぼり）」および「破堤拡大」についても、今後、取り組みが必要な課題として提起する。

一部、重複する部分はあるが、「落堀の特性と形成抑制」および「破堤拡大の特性と拡大抑制」について、それぞれ、4.1および4.2の通り考察する。

4.1 落堀の特性と形成抑制

堤防が破堤すると、浸水流により堤内地側の地盤が侵食され、「落堀」が形成される。下記に、既往の破堤被害において発生した「落堀」の事例を概観するが、「落堀」が破堤、さらに破堤拡大に深く関わる事が分かる。

落堀例1：円山川・越流破堤

第1章の事例1の円山川の破堤（最大破堤幅 119m）では、写真13のように落堀が形成されている。また、図32は、堤内地の落堀の深度分布であるが、最大の侵食深さは3mである。従って、堤防高(T.P.6.91m)を約7mとすると、天端と落堀の底面の比高差は最大で10mになっていることになる。

さて、落堀には浸水の滞水によりウォータークッション効果が想定されるので、上記の比高差が直接的に関係するわけではないが、落堀が形成されない場合と比較すると、落堀が形成されることにより比高差が増加することは実現象と言える。

ここで、落堀の形成による「天端と堤内地地盤の比高差の増加」による影響の一つは、浸水流の流速が増加し、浸水量が増量されることである。さらに、流速の増加により、破堤断面（上下流側）の侵食が加速化し、破堤の拡大が増長されるとともに、浸水量も増長されることである。

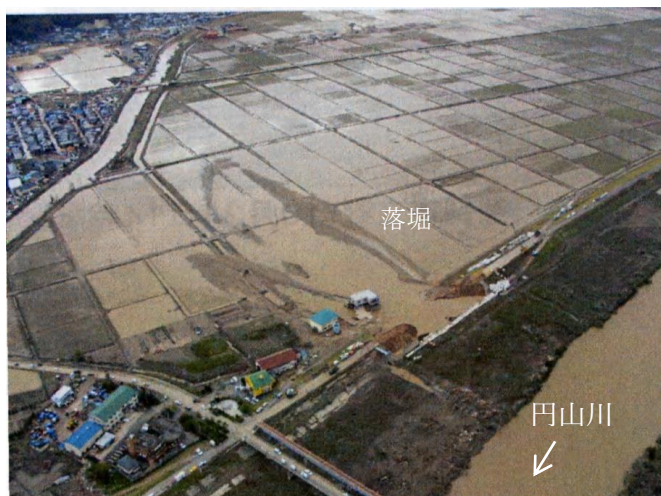


写真13 破堤と落堀の形成：円山川右岸立野（写真1右、再掲）

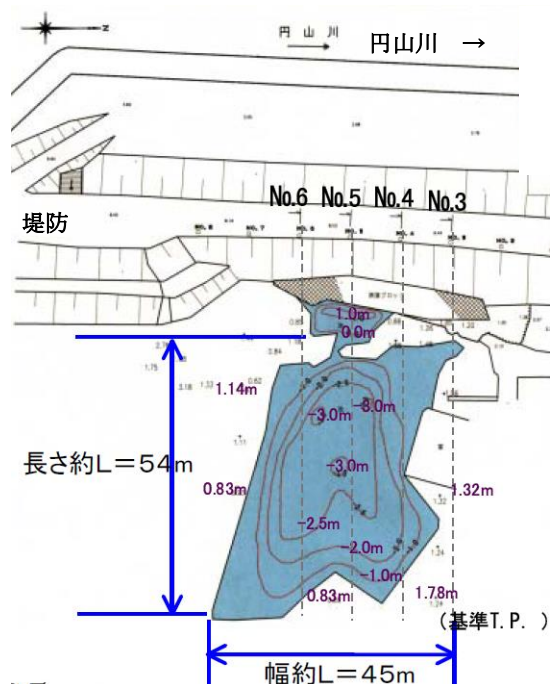


図32 落堀の深度分布：円山川

落堀例 2：鬼怒川・越流破堤

第 1 章の事例 4 の鬼怒川の破堤では、写真 14 のように堤内地には大規模、広範囲に落堀が形成されている。また、写真 15 は、4 つの方向からの侵食、落堀の形成状況であるが、県道 357 号（平坦道路）は浸水流の侵食により決壊し、流出している。なお、写真の通り、侵食は 2 段で形成されているため、本文では、比較的面的に形成されている「一次侵食面」と、さらに深掘れしている「二次侵食面」に区分している。

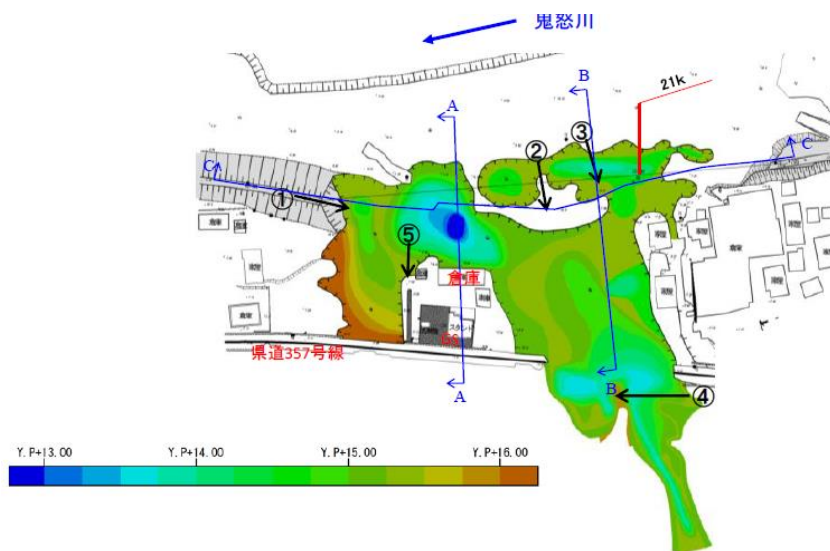
図 33 は、堤防調査委員会に係る調査結果²⁶⁾であり、写真 11 の全域ではないが、主として右側（北側）の落堀の深度分布である。同図によれば、GS（ガソリンスタンド）、倉庫の背後の堤防裏法部が最も深く、5m 程度とされる。また、県道 357 号を越えた下流側の侵食が大きいことが分かる。



写真 14 堤内地の侵食および落堀の形成：鬼怒川堤防調査委員会／文献 26 の資料に加筆



写真 15 堤内地側の地盤侵食²⁷⁾：左上・堤防側から流下方向を臨む、左下／GS 側から県道 357 号の北側、右上／県道 357 号の北側から GS 方向、右下／県道 357 号の北側の決壊断面



地盤高コンター図（平成 27 年 9 月 11 日、19 日測量成果）

図 33 地盤コンター図：鬼怒川堤防調査委員会資料²⁶⁾による

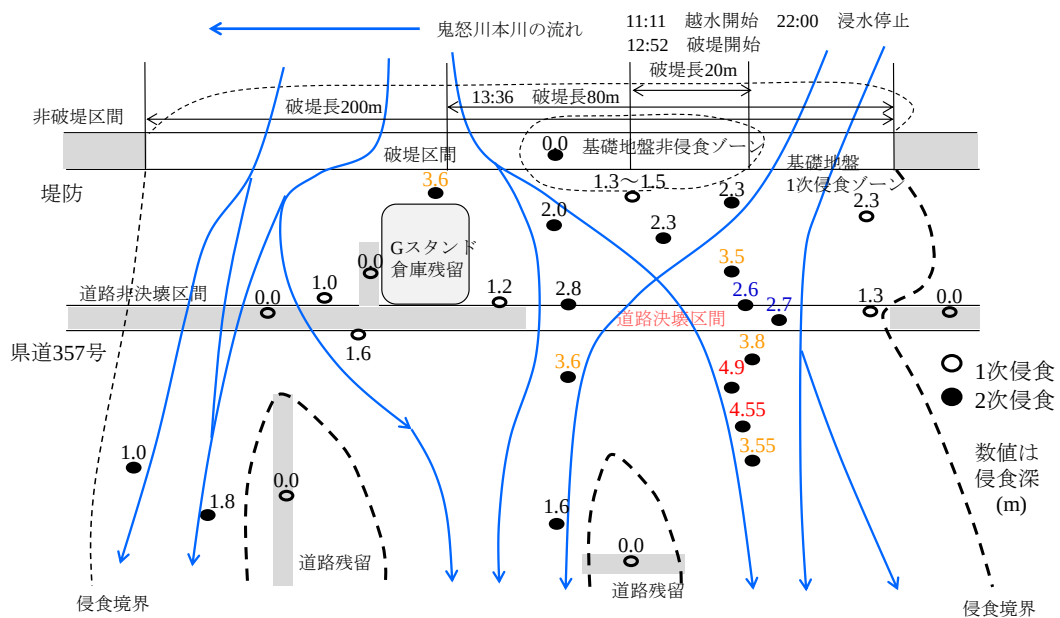


図 34 現地計測による落堀深度の分布の概念図²⁷⁾

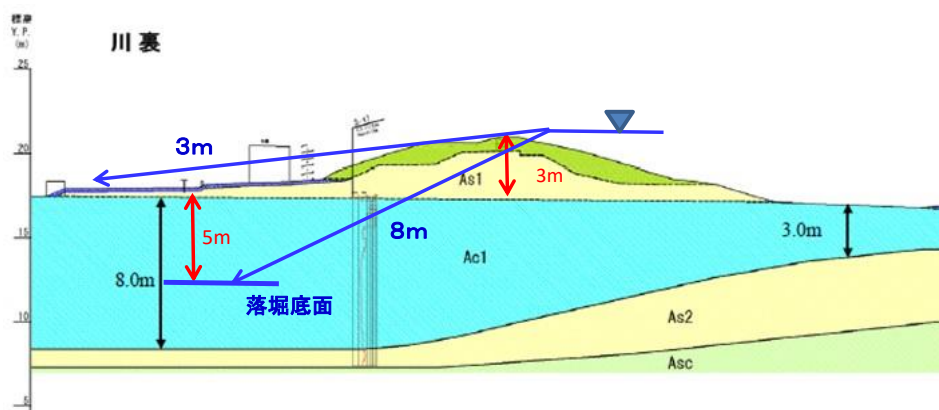


図 35 落堀による越流の落差高の増加の概念：鬼怒川堤防調査委員会の資料：文献 26 に加筆

また、図 34 は、筆者が現地計測した落堀深度の分布であるが、点計測であり、侵食の特徴を示す概念図として作成したものである²⁷⁾。同図からも、図 33 と同様に、GS 背後の深い落堀が確認されていると共に、県道 357 号の下流側でも相当規模（4.9m など）の侵食になっていることが分かる。これらの落堀の侵食特性は、参考文献 27 を参照されたい。

ここで、図 35 は破堤箇所の堤防（堤防高 3m）および基礎地盤の横断面図である。同図のように、落堀の最大深さは 5m 程度であるが、落堀が形成されない場合（比高差 3m）と比較して、堤防天端と落堀の底面の比高差は 8m になることをイメージしている。このような落堀の形成による影響は、円山川（最大破堤幅 119m）と同様であるが、鬼怒川では破堤の最大拡大幅が 200m に至っている。

落堀例 3：那珂川・越流破堤

第 1 章の破堤の 6 事例には取り上げていないが、令和元年（2019 年）10 月の台風第 19 号により、茨城県的那珂川で 3 箇所、久慈川で 3 箇所が破堤している。ここでは、那珂川左岸 40.0k 付近（常陸大宮市野口地先）の破堤により形成された落堀を例示する。

当該堤防では、図 36 の左上の写真あるいは下図の測量平面図のように、堤内地に落堀が形成されている。また、最終的に約 200m（報告書による：なお、関係図からは 100m 程度と想定される）の幅で堤防が決壊とされている。なお、越水や決壊の時刻は確認されていない、越水深 60cm の越流が原因とさ



図 36 落堀の形成状況：那珂川左岸 40.0k、鬼怒川堤防調査委員会の資料：文献 28 に加筆

れている。また、図 36 の右上で示される落堀の計測深さによれば、測線 1 では川裏法尻付近で最大約 3.8m、測線 2 では天端法肩直下で最大約 6.2m である。

上記から、堤防高は 3.16m（天端 T.P.30.82—堤内地地盤 T.P.27.66）であるので、単純に、落堀の形成により、天端からの越流水の落差は、3.2m 程度から 7.0～9.4m まで増加していたことになる。

また、当該堤防における落堀の影響も、円山川、鬼怒川と同様であるが、当該堤防では、さらに下記の特筆すべき事象がある。

写真 16 の左、右下は被災直後の状況であり、破堤区間とそれに隣接した非破堤区間を比較したものである。いずれの区間も越流しているが、堤内地側の地盤状況に違いがあることに注意が必要である。つまり、破堤区間は農地であるのに対して、越流しても破堤に至らなかった区間は、法尻に舗装道路がある。これは、道路舗装が越流水による裏法尻の侵食を防止したことを示唆しており、堤防の裏法先の状態が堤防の破堤に深く関わること、道路舗装のような被覆が有効であることを示す好例である。

なお、写真 16 の右上は、応急復旧の状況であるが、破堤区間は「ブロックマット」、非破堤区間は「接続ブロック」により法面を被覆しており、採用工法が異なっている。



写真 16 破堤区間と非破堤区間の比較：那珂川左岸 40.0k、左・破堤箇所の全景、右上・応急復旧状況（2021.3）、右下・写真左の①による非破堤部の状況 ＊文献 28 に加筆

以上の破堤により形成される「落堀」の事例によれば、「落堀」により、i) 比高差の増加 → ii) 浸水流速の増加 → iii-1) 堤体の侵食の増長、iii-2) 破堤の上下流堤防断面の侵食促進 → iv-1) 破堤の促進、iv-2) 破堤幅の拡大 → v) 浸水量の増加のプロセスにより連鎖、発展するので、破堤、さらに破堤拡大に深く関わる事が明白である。

そのため、通常、「落堀」が形成される堤内地は、河川管理区域外であるとされ、河川行政が及ばないとされているが、「落堀」は官民境界に関係なく形成され、河川区域内の堤防の安定性にも深く関わるため、官民境界を越えた対応が望まれる。

このような官民境界に係る同様な課題として、道路の場合、道路管理区域外からの土砂崩壊、倒木などの、いわゆる、「貫い災害」があり、他方、道路盛土の崩壊が民地に及ぶ場合の対応がある。そのため、道路管理者は、前者の民地側の危険要因に対しては、点検・監視を実施し、必要に応じた対策をとり、

後者の民地側への危険要因に対しては、隣接構造物への影響に配慮した対応策がとり、道路区域を含めた沿道の安全性を確保するように整備し、管理している。

このような道路の対応に倣い、洪水による浸水、特に、本文の本题である「落堀」の形成に対する対応を考えると、河川管理者による粘り強い堤防構造の実現に留まらず、民地側での「落堀」形成の抑制（4.2、後述）と連携することが、官民双方において有効、有益であると言える。

なお、堤防と隣接する民地、道路などの施設、構造物とは、複合構造の関係にあると位置づけると、被災原因の究明あるいは効果的な対策が考えられるようになる。これは、参考文献 29)が主旨とする「分野間複合構造最適」による「全体最適」と言うことができる。

参考文献

- 26) 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会 報告書、平成 28 年 3 月。 【再掲】
 27) 常田賢一：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による破堤に伴う落堀に関する現地調査からの考察、第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム、一般論文I-1、2015.12。 【再掲】
 28) 那珂川・久慈川堤防調査委員会：那珂川・久慈川堤防調査委員会 報告書 令和 2 年 3 月。
 29) 常田賢一：防災・減災、国土強靱化のための性能評価の最適化の実務－個別最適から全体最適への展開－、（一社）地域国土強靱化研究所、2023.3.

4.2 破堤拡大の特性と拡大抑制

本文の 2 章では、破堤特性およびその性能評価に言及したが、そのうち、特に「破堤拡大と抑制」の視点から、それらの必要性について、下記の通り考察する。

2 章では、表 1（再掲）、写真 5（再掲）による鬼怒川の破堤における破堤拡大の推移から、破堤拡大速度は堤防の粘り強さの指標になること、破堤拡大速度が諸条件により変化することに言及した。

ここで、破堤拡大速度を抑制することは、破堤拡大の抑制対策に通じるので、抑制条件を明らかにすることが有効であるが、鬼怒川の事例では、樹木・建物等の浸水流に対して障害となる事物の存在あるいは堤防断面の規模を例示した。また、前節の 4.1 の那珂川左岸 40.0k の破堤箇所では、裏法先に設置された道路舗装が侵食防止、さらに破堤拡大の抑制になることを例示した。

表 1（再掲） 越流開始、破堤開始から破堤拡大停止までの推移

時刻	11:11(想定)	12:52(想定)	13:36	15:18	16:19(推定)
堤防状況	越流開始	破堤開始	破堤拡大	破堤拡大	拡大停止
破堤幅		20m	→ 80m	→ 140m(推定)	→ 200m
所要時間	1時間41分	44分	1時間42分	61分	
破堤拡大速度		1.3m/分	0.57m/分	1.0m/分	

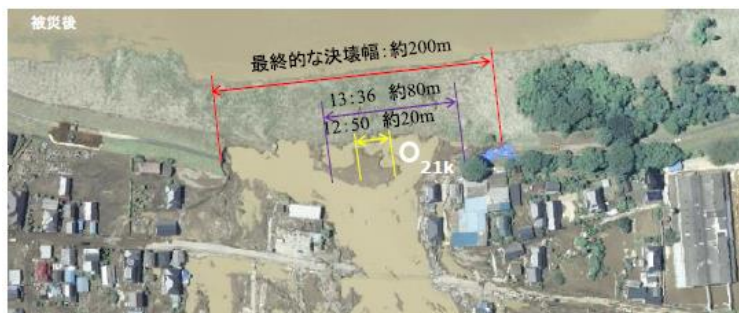


写真 5（再掲） 破堤幅の推移 ³⁰⁾

下記では、樹木による浸水抑制、侵食抑制の効果に着目して、その意義を考察する^{31),32)}。

鬼怒川の左岸の常総市三坂地区での越流破堤の状況は、**写真 17**（9 月 10 日、15:18）の通りである。越流の開始は 11:11 頃であり、その 1 時間 40 分後の 12:52 頃に破堤した。**写真 17** は破堤開始から約 1 時間 40 分が経過した時点（15:18）の状況であるが、破堤幅は破堤開始時の 20m から 140m 程度に拡大しており、堤内地に浸水中である^{31),32)}。

ここで、**写真 17** には有益な示唆があるが、それは、水が勢いよく流れているのは二本の矢印の領域であり、破線で示す領域は水の流れがほとんど無いことである。この領域は“死水域、死水ゾーン”と呼ばれるが、死水ゾーン内の家屋には流水力はほとんど作用していなかったと言える。しかし、滞水状態にあり、流出していないが、家屋の床下の基礎地盤は侵食され、空洞化していた。当時、この家屋は流出しなかったため、“白い家、凄い”と注目を集めていたが、死水ゾーンにあること、さらに、**写真 17** から分かるように、この家の上流側には流されてきた他の家屋が引っ掛かっていることから、この家には直接的な流水力が作用していないことから、流出を免れたことは必然である。この事例の教訓は、土木技術者は表面的、感覚的な事象に惑わされず、その背景、原因を思索することの重要性である。

さらに、考察すべきことは、何故、死水域が形成されたかの理由であるが、それは**写真 18** から類推できる。同写真は 14:30 頃の状況だが、中央に残留する家屋とその上流側に隣接する立木にヒントがある。つまり、この時点では、写真の右からの浸水流は、立木の幹およびその直下流の家屋に阻害されて、左右に分流していることが見て取れる。その結果、**写真 18** の二本の主たる流路が形成されたと推測される。その後、家屋は 14:40 頃に流出し、立木は 15:00 頃に流出し、15:18 には**写真 17** の状況に至った。なお、**写真 17** には流出家屋と立木の位置を○印で示すが、流出後も主たる流路は変わっていない。



写真 17 浸水状況：国土交通省関東地方整備局提供に加筆



写真 18 浸水と住宅と立木：文献 33 の映像のカットに加筆

従って、本例の示唆、教訓は、最終的には流出した**写真 18** の家屋と立木が粘り強く残留したことにより、浸水の主たる流路が形成され、それにより死水域が形成されて、下流にあった家屋は流出という致命的な被害を免れたことである。

すなわち、家屋は浸水流を考慮した設計はしていないと思うが、その被害については、家屋だけを見るのではなく、周囲の浸水流の特性をも踏まえた評価が必要であり、それにより対策のヒントが得られる。ここで、洪水時の浸水は土木工学の水理学の範疇であり、死水域は必然の現象である。

参考文献

- 30) 国土交通省関東地方整備局：鬼怒川堤防調査委員会資料、第 1 回：平成 27 年 9 月 28 日、第 2 回：平成 27 年 10 月 5 日、第 3 回：平成 27 年 10 月 19 日、第 4 回：平成 28 年 3 月 7 日。 【再掲】
- 31) 常田賢一：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による破堤に伴う落堀に関する現地調査からの考察、第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム、一般論文I-1、2015.12。 【再掲】
- 32) 常田賢一：最近の土砂災害・洪水災害に対する視点、Structure, No.147, pp.48-51, 2018.7.
- 33) ANN NEWS 中継 栃木、茨城に特別警報 鬼怒川の堤防決壊 (9/10)、2015.

4.3 破堤および破堤拡大の対策

近年の越流破堤の被害の状況が鑑みられて、越流に対して粘り強い堤防構造の整備の必要性が謳われ、取組みが強化されているが、我が国では、一時期（1990 年代）、難破堤型堤防が検討され、取り組まれた経緯がある。しかし、その後、その取組みは止まり、近年の豪雨等の降雨・出水の激甚化、越流破堤被害の多発、甚大化するまでの概ね 20 年間は、特別には意識されない、しない状態で推移してきた。本節では、まず、難破堤型堤防、次に、今後の粘り強い堤防構造、浸水対策を概観する。

4.3.1 アーマーレビーによる難破堤型堤防

1990 年代には、難破堤型堤防、耐越水型堤防が考案され、「アーマーレビー（装甲堤防）」と呼ばれ、旧土木研究所において研究開発が実施されていた。図 37 は構造概要であり、表法～天端～裏法～裏法尻に至る、堤防の全面を被覆、保護、強化した構造になっており、最近の「危機管理型堤防構造を上回る粘り強い堤防構造」になっており、同構造に拠れば、越流に対して難破堤が実現できると言える。

しかし、同堤防構造³⁴⁾は、全国的にパイロット事業としても取り組まれていたが、2000 年代に入り、その取組みは止まったが、現在に通じる、研究開発の下地があったことは知っておくことは必要である。

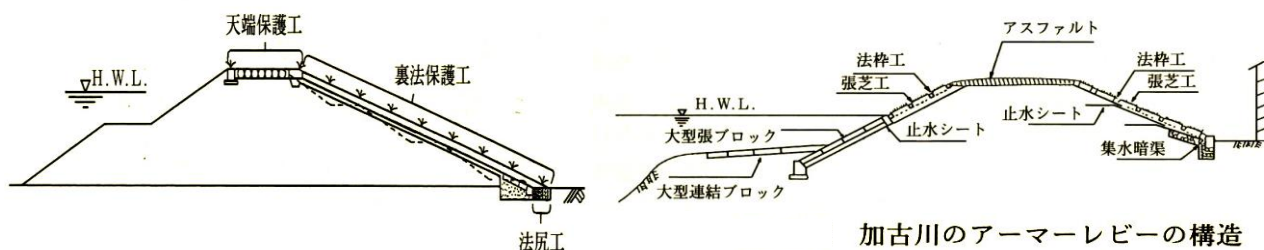


図 37 アーマーレビーによる越流対策構造³⁴⁾

参考文献

- 34) 河川堤防設計指針、2000.6.

*左記が拠り所とされているとのこと。

4.3.2 粘り強い堤防構造への展開

2015 年の鬼怒川の越流破堤を受けて、「危機管理型ハード対策」が打ち出され、天端の舗装による防護とブロックなどによる法尻の防護が実施されたが、その後、2019 年の千曲川などでの越流は破堤を受けて、「危機管理型ハード対策を上回る粘り強い堤防構造」の整備が謳われ、2022 年 5 月の検討会による「越水に対する性能」の付加により、今後、本格的な堤防強化の一層の推進が期待されている。

本節では、第 1 章など、近年の洪水被害に基づいて、本文が主旨とする、堤防の「破堤」および「破堤拡大」の抑制に着目して、実現象を踏まえて、想定できる各種の対策を考察する。

さて、効果的な対策のためには、越流により発生する現象を想定することが有効であるが、河道の水位上昇、越流により発生する現象は図 38 で想定できる。つまり、堤内の浸透と浸潤面上昇、裏法での越流水の流速増加、法尻部の堤体侵食、法尻下部地盤の侵食、裏法先地盤の侵食、堤内地地盤の侵食・落堀の形成および裏法の侵食があるが、効果的な対策のためには、計画、設計する対策によりどのような現象が抑制できるか、抑制しようとするのかを明確にすることが必要である。

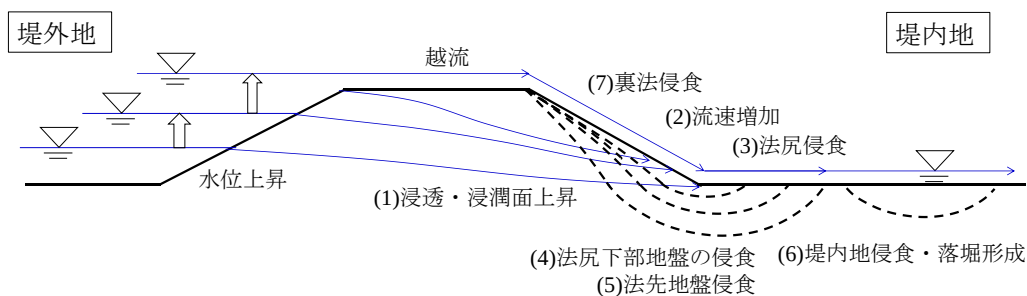


図 38 河道の水位上昇と越流により発生すると想定される現象³⁵⁾

さらに、破堤および破堤拡大の防止・抑制対策、さらに堤内地における防止・抑制対策として、次の①～⑧の 8 項目が提示できる。

- ① 堤体の不飽和化：不飽和化により強度低下を防止・抑制する／湿潤状態では弱体化する。
【対策例】ドレーン工、かご工、透水性ブロック・・・
- ② 天端構造による裏法の侵食抑制：天端の保護・強化により、ひさし効果を図り、浸水抑制する。
【対策例】天端舗装、法肩保護工の設置、法肩保護工の長尺化：改良舗装工、アスカーブ・縁石の設置・・・
- ③ 裏法面の難侵食化：裏法面の保護、強化により耐侵食性を高める。
【対策例】植生被覆、連接ブロック、グリッド敷設、かご工、覆土・・・
- ④ 裏法尻・法先地盤の難侵食化：裏法尻・法先の保護、強化により、耐侵食性を高める。
【対策例】ブロック、かご工、法留め工、基礎工・・・
- ⑤ 落堀形成の抑制：浸水流の増長に繋がる“落堀”の形成を防止する。
【対策例】舗装（道路）、地盤改良・・・
- ⑥ 破堤拡大の抑制：浸水量の抑制のために、破堤の拡大を防止・抑制する。
【対策例】堤防断面拡大（スーパー堤防など）、腹付け盛土（桜堤など）、樹林帯・・・
- ⑦ 水防活動による越水抑制：応急的な措置により、浸水、破堤拡大を抑制する。
【対策例】天端の応急嵩上げ（土のう設置など）、裏法遮水シート設置、破堤拡大防止措置（ブロック投入など）・・・

⑧ 堤内地・住宅の浸水対策：浸水、浸水流を防止・抑制する。

【対策例】地盤・宅地の嵩上げ、ブロック塀の設置、植樹・・・

これらの対策項目について、①～④、⑥は河川管理者、⑦は地元の消防団、⑤、⑧は堤内地の住民、地権者が関わる対策である。また、「破堤」の防止・抑制には、①～⑤、⑧が関係し、「破堤拡大」の防止・抑制には、直接的な⑥の他に、⑤、さらに①～④、⑦も間接的に関係している。

なお、上記の①から④のイメージは、図 39 の通りである。

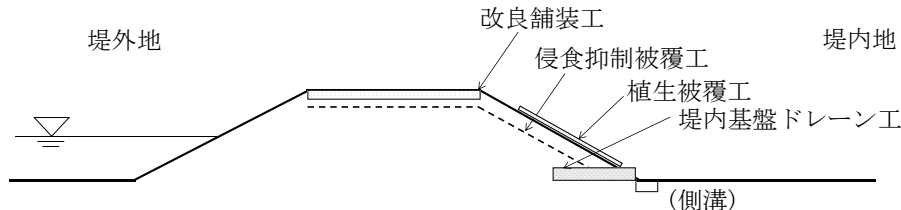


図39 堤防を越流に対して粘り強くする構造のイメージ例³⁵⁾

なお、上記の【対策例】のうち、特筆できる点を次の(1)～(10)に列記する。

- (1) かご工は、鉄線かご（菱形金網、溶接金網）に碎石、栗石を積めたものであり、法尻、法面に設置されるが、透水性に加えて、越流水の減勢が期待できる（写真 19 参照）。なお、通常、設計仕様とされている「ドレーン工」は、碎石＋吸出し防止材の構造であり、排水性は高いが、越流水による減勢は考慮していない。そのため、かご工はドレーン工として扱われているが、両者の構造的な差異の認識が必要である。
- (2) 法面、法尻に設置されるコンクリートブロックは、継ぎ目以外の通水性、通気性が小さいあるいは期待できないが、通水性、通気性のあるブロックが開発されている。
- (3) 法肩保護工の長尺化とは、法肩ブロック長を延ばすことである（図 40 参照）が、越流に対するひさし効果の範囲拡大と越流水の法面方向への誘導効果を高めることができる。
＊著者の構想であり、現時点では一般化されていない。
- (4) アスカーブは、天端の舗装の排水処理のために設置される（写真 20 参照）。表面水の処理を誤ると、法面への影響があるともされるが、その高さによる浸水抑制が期待できる。
- (5) 法面に敷設するグリッドは、ネット構造であるため、堤体土と覆土の一体化、植生の成長・活着などの効果が期待できる。
- (6) 落堀対策としての裏法先の舗装は、本文の 4.1 の通り、法先・法尻の侵食防止効果がある。
- (7) 堤防の大断面化は、侵食代の確保の意味で、侵食抑制（侵食速度抑制）として有効である。
- (8) 樹木は、堤内地側の法先に設置されると、侵食抑制、侵食拡大抑制、漂流物・流入物の抑止など、堤内地では浸水抑制、漂流物の抑止などの効果が期待できる。例えば、写真 21 は河川管理上で位置づけられた“樹林帯”³⁶⁾であり、立木が“群”として存在する樹林帯は流速の低減効果があるとされ、それによる浸水量の抑制、破堤幅の拡大抑制、破堤口の浸水流の流速低減などが期待できる。敷地などの確保の制約はあるが、グリーンインフラとしても幅広い活用が考えられる。
- (9) 水防活動において、図 41 の「みずのあふれ（越水）対策」³⁷⁾があるが、写真 22 のように「土のう」の敷設が一般的であるが、土のうを代替する製品も考えられる。例えば、表法に使用されている、図 42 の「シート張り工法」³⁷⁾は、河道側の水流に対する表法の保護（侵食防止）対策であ

るが、水防工法としてはやや大がかりになるが、表法と同様に措置することは可能と思われ、法肩から法面に至る広い範囲で越流水の堤体への影響（浸透、侵食）が抑制できるので、越流に対する裏法への対策にも応用ができる。

＊著者の構想であり、現在、表法には適用されているが、裏法への適用は一般化していない。

- (10) 堤内地、住宅においても浸水対策をすることが、必要かつ有効である。樹林帯に類似したものを堤内地で考えると、住宅地や公共空地などの土地利用計画において、植樹帯を適切に配置し、浸水流の勢いの低減、浸水流の方向の誘導、さらには漂流物の阻止・捕捉などが考えられる。



かご工の設置のイメージ例



2段積み例

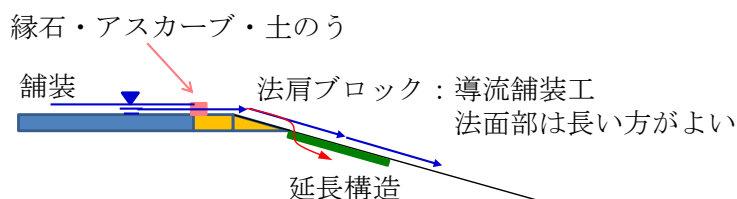


傾斜構造例

写真 19 かご工の設置例



(a) 通常の法肩保護ブロック



(b) 延長ブロック構造の概念例

図 40 法肩の保護工とその拡大例



写真 20 天端舗装のアスカーブ例



写真 21 堤内地側の法尻の樹林帯

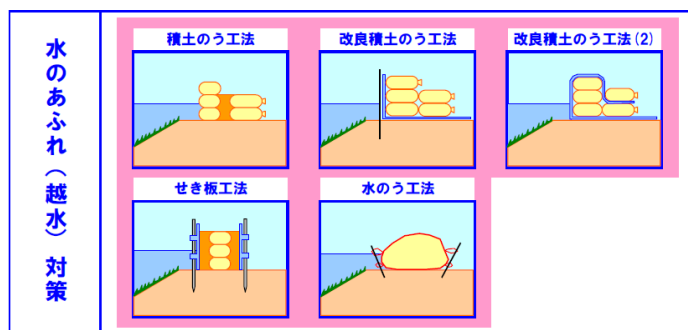


図 41 水があふれ（越水）対策³⁷⁾



写真 22 水防活動による土のうの設置例³⁸⁾

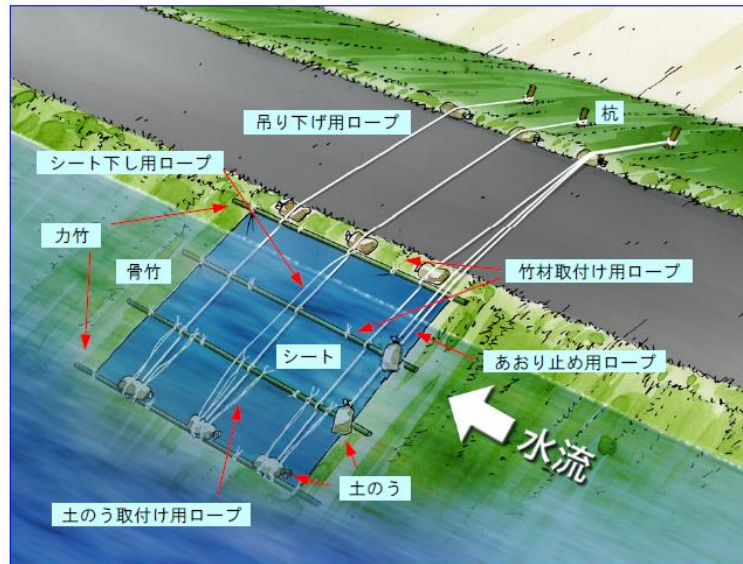


図 42 表法でのシート張り工法³⁷⁾

【参考】土のう工法などの緊急措置による水防活動の意義

2015 年関東・東北豪雨による鬼怒川：三坂地区において、越流開始（11:11）から河川水位がピークに至る（12:23）までは 1 時間 12 分を要している。仮に、堤防が破堤しない状態で河川水位の低下が上昇時間と同じとすると、堤防高に低下する時刻は 13:35 となる。言い換えると、河川水位の上昇・下降の合計時間の 2 時間 24 分（概略で、2 時間 30 分とする）の間では破堤しない粘り強さを堤防が保持していれば良いことになる。これは、越流に対して堤防に要求される耐越流時間と言える（下記、参照）。

越流開始	河川水位のピーク	堤防高に低下
11:11	12:23	13:35（推定）
越流深 0m	0.31m	0m
≒2 時間 30 分（越流破堤に至らないための耐越流時間）		

さらに、例えば、天端に 0.2m の止水構造（土のうなど）があったとした場合は、越流に必要な水位は 0.11m となるが、水位上昇速度を 0.0048m/分とすると、越流継続時間は 52 分となり、当該堤防が破堤に至った越流継続時間（1 時間 40 分）より短くなることになり、破堤に至らないことになる。

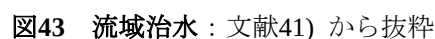
これは、洪水時の水防活動の土のう工法などによる緊急措置により、天端高の嵩上げ効果、粘り強さの向上を示唆しており、洪水時の中において、土のう工法の措置が可能な場合は、水防活動は有効であることを示唆する³⁹⁾。

参考文献

- 35) 常田賢一：堤防の越流破堤および対策に関する考察、Kansai Geo-symposium、2016.
- 36) 河川管理施設等構造例施行規則第十四条二：最終改正：平成二五年七月五日.
- 37) 国土交通省中国地方整備局：時代に即した水防工法 工法選定と作成の手引き（第 1 回改訂版）、平成 19 年 3 月.
- 38) 国土交通省：平成 23 年新潟・福島豪雨水害を教訓とする今後の治水対策について【参考資料集】、平成 23 年 12 月.
- 39) 常田賢一：関東・東北豪雨における堤防被害－越流破堤について－、豪雨による土砂災害に関する講演会、（一財）災害科学研究所、平成 28 年 12 月 7 日.

国土交通省は、平成 30 年（2018）7 月豪雨、令和元年（2019）東日本台風などの災害を受けて、2020 年 1 月に「総力戦で挑む防災・減災プロジェクト～命と暮らしを守る防災減災～」を立ち上げ、同年 7 月にプロジェクトをとりまとめたが、その後の 2020 年 7 月豪雨などの災害の教訓も踏まえて、2021 年 6 月に「総力戦で挑む防災・減災プロジェクト 第 2 弾」⁴⁰⁾がとりまとめられている。

これらの施策は、『全国の一級水系などにおいて、河川整備に加え、流域の市町村などが実施する雨水貯留浸透施設の整備や災害危険区域の指定等による土地利用規制・誘導等、都道府県や民間企業等が実施する利水ダムの事前放流等、治水対策の全体像について「流域治水プロジェクト」として示す、ハード・ソフト一体となった事前防災対策を加速してゆく。』とされ、また、他分野、多方面にわたっており、その意味では「全体最適」の視点と言える。



「流域治水」は、気候変動の影響や社会状況の変化などを踏まえ、河川の流域のあらゆる関係者が協議して、流域全体で行う治水対策への転換として位置付けられており、治水計画を「気候変動による降雨量の増加などを考慮したもの」に見直し（主要2施策）、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、地域の特性に応じ、① 氾濫をできるだけ防ぐ、減らす対策、② 被害対象を減少させるための対策、③ 被害の軽減、早期復旧・復興のための対策をソフト・ハード一体で多層的に進める・・・とされている（図 41 参照）^{40),41)}。

図 41 の通り、対象流域は上流から下流に至る集水域・河川区域・氾濫域であり、関係者は国・県・市等・企業・住民であり、対策の姿勢は防ぐ：防災、減らす：減災およびソフト対策&ハード対策であり、多様かつ柔軟な視点、姿勢が基本であると言える。

このような、新たな政策の方向性を示す、「流域治水」は「流域最適」による「全体最適」であり、ソフト、ハードのいずれにも関わる幅広い性能評価が必要であると言える。

他方、流域最適において、河川堤防の性能設計は、河川堤防の性能向上の取組みであるが、従来からの姿勢、視点である、天端、法面、法尻の部位毎の技術・工法の開発は「個別最適の深化」と言える。そして、新たな姿勢、視点である、部位のパッケージ化は「部材間複合構造最適」、堤防と隣接する堤内地の諸施設（舗装道路、立木など）との複合化、一体化は「分野間複合構造最適」であり、いずれも「全体最適」と言える。さらに、地域ごとに固有な堤防の性能向上は「地点・箇所最適」と言えるが、集水域・河川区域・氾濫域において、それぞれに相応しい施設、構造物を連携させて整備することは「地域最適」による「全体最適」と言える。

このように、「流域最適」の取り組みに際しては、「個別最適の深化」および多様な「全体最適への展開」の両姿勢、視点が有効であり、これらにより、将来の想定外の事象に対しても柔軟な対応、言い換えると、「粘り強い防災・減災、国土強靱化」が可能となる。

なお、「個別最適」、「全体最適」の姿勢、視点の概念およびそれらの具体例に関しては、文献 42)を参照されたい。

参考文献

- 40) 国土交通省：総力戦で挑む防災・減災プロジェクト～命と暮らしを守る防災減災～【第2弾】、パンフレット、2021年6月。
- 41) 国土交通省 水管理・国土保全局：「流域治水」の基本的な考え方 ～気候変動を踏まえ、あらゆる関係者が協働して流域全体で行う総合的かつ多層的な水災害対策～、
https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/pdf/01_kangaekata.pdf
- 42) 常田賢一：防災・減災、国土強靱化のための性能評価の最適化の実務－個別最適から全体最適への展開－、（一社）地域国土強靱化研究所、2.2.4.2 異分野間の最適化：分野間複合構造最適／p.53-57、2.2.5.1 土地利用・広域最適／p.59-63、2023.3.

まとめ

本文の事例の検証および考察により、次の知見が得られ、課題の提起ができる。

- (1) 洪水時の越流、破堤などによる浸水被害を抑制、防止するためには、破堤の有無およびその原因、対策に留まらず、浸水被害の規模に深く関わる破堤拡大にも眼を向けて、その原因、機構、対策の検討が必要である。さらに、破堤を前提とする、是認するのではなく、致命的な破堤はさせない堤防構造も志向することが望ましい。
- (2) 河川堤防の粘り強さの視点による性能評価に必要な性能評価指標は、次の①～⑥が考えられる。
 - ① 越流水深
 - ② 越流から破堤までの越流継続時間
 - ③ H.W.L.超過から破堤までの H.W.L.超過継続時間
 - ④ 破堤幅
 - ⑤ 破堤拡大継続時間
 - ⑥ 堤防自身の「耐破堤越流時間」ここで、①、②および⑤は「耐破堤越流性能」、③は「耐破堤浸透性能」、④および⑤は「耐破堤拡大性能」と呼ぶことができる。
- (3) 河川堤防の破堤に関わる既往調査では、性能評価に必要なデータ（堤防高、H.W.L.の超過時刻、越流開始時刻、越流停止時刻、破堤時刻、H.W.L.を下回った時刻、破堤開始時の破堤幅、破堤拡大推移（時刻、破堤幅）、破堤拡大方向、最終的な破堤幅、浸水開始時刻（＝越流開始時刻）、浸水停止時刻など）が、系統的に整理されていない状況にある。そのため、今後の堤防の被災（特に、破堤）調査では、性能評価に必要な諸データ、指標の調査、分析、考察が必要である。
- (4) 河川堤防の破堤の形態には、越流破堤、堤体浸透破堤、基礎地盤浸透（パイピング）破堤および侵食・洗掘破堤があり、洪水特性、堤防・基礎地盤の特性などにより、いずれの形態の発生も内在しているため、ある特定の発生災害の対策に留まらず、今後、想定される破堤形態も考慮した検討が有効である。それにより、個別的対処の堤防強化に留まらない、破堤の系統的な予防を図ることができる。
- (5) 河川堤防の越流破堤では、隣接する（河川区域外の）堤内地で形成される「落堀」が破堤、さらに破堤拡大に関係している。また、破堤による被害規模は、破堤後の破堤拡大が大きく影響する。しかし、破堤などの重要な課題が発生した場合に設置される「堤防調査委員会」は、破堤の原因の解明とそれを踏まえた堤防構造、対策の検討が、とりあえず解決すべき命題とされているためか、「落堀」および「破堤拡大」に関しては十分には考慮されていない状況にあると思われる。しかし、越流破堤の抑制、さらに浸水被害の抑制のためには、「落堀」および「破堤拡大」について、それらの発生特性の解明と効果的な（事前・事後）対策の検討が有効である。
- (6) 河川分野では、流域治水に政策転換しつつあるが、それは「流域最適」、「全体最適」と言え、今後は「全体最適」による想定外への対応が必須である。他方、堤防の性能向上は流域治水を実現するために必要な技術の向上、言い換えると、「個別最適の深化」である。

以上のように、河川堤防の破堤に関わる性能評価は、性能評価の視点、姿勢に応じた性能評価指標および評価基準を設定することにより可能である。しかし、性能評価指標、性能評価基準は定量的評価が望ましいものの、解決の必要な課題が多いことが現状であり、継続的な研究・開発が望まれる。