河川堤防の洪水時の破堤特性と性能評価の考察

常田賢一

応用地質(株)顧問、大阪大学大学院 名誉教授

1. まえがき

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)などによると、下図の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越流破堤が多い。

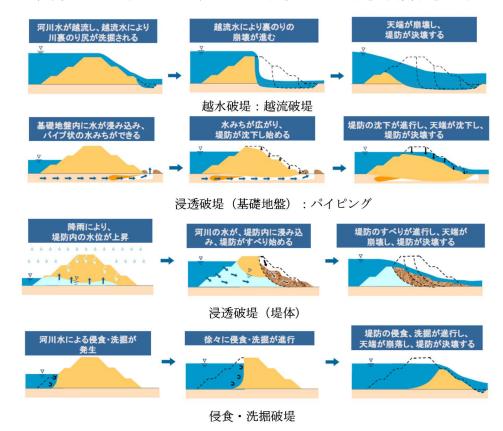
事例 1:2004 年 10 月台風 23 号 円山川 豊岡市立野地区 *越流破堤 事例 2:2004 年 10 月台風 23 号 出石川 出石町鳥居地区 *越流破堤

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

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"による共通の視点により、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。



2. 破堤特性に関する既往事例の整理

本章では、性能評価の視点から洪水時の堤防の破堤特性に関する事例のレビューを行う。

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 1)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」2)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 1 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 4 参照)。なお、破堤幅は $30m\rightarrow119m$ 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。

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 TP+8.07-堤内地地盤 TP+1.16)によれば、6.91mと読み取れる。

以上から、事例 1 に関して、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する。





写真1 円山川の立野地区の破堤状況:左・全景、右・近景1

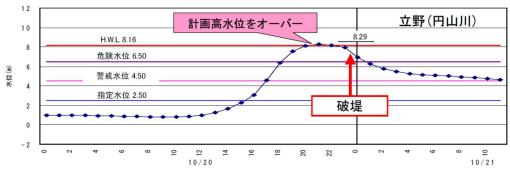


図1 立野水位観測所(13.0k)の水位履歴¹⁾

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」としている。

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、平面二次元不定流解析(図 2 参照)によると、越流深さは 47cm (ピーク水位 10.95mー堤防高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。

以上から、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する。

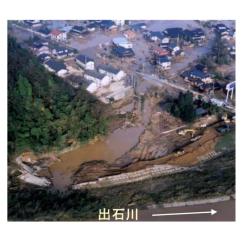


写真 2 出石川の鳥居地区の破堤状況 1)

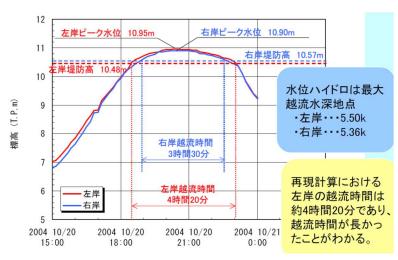


図2 二次元不定流解析による水位ハイドロ1)

なお、事例 1 および事例 2 の堤防の破堤要因は、以下の通りとされている $^{2)}$ 、いずれも越流が直接的な破堤要因である。

【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。

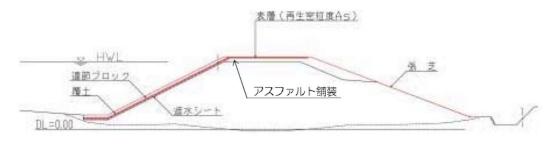
【事例 2: 出石川左岸 5.4k】

「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。

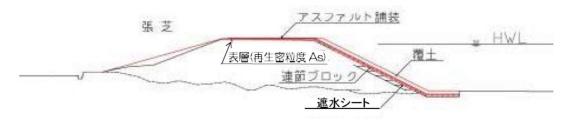
この地点は外水の水衝部に相当し、流下能力を越え越流した水が裏法尻部で集中する湾曲した 堤防法線形状のため裏のり面の侵食が助長され、破堤したものと推測される。また、堤防断面 が相当程度減少した状態において、外水圧または浸透の影響もあったものと推測される。 また、事例1および事例2に関して、以下の堤防強化の基本方針²⁾が出されている。

- 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3参照。
- 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、連接ブロック)、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。



(a) 円山川右岸 13.2k の浸透対策



(b) 出石川左岸 5.4k の浸透対策

図3 堤防強化のための浸透対策2)

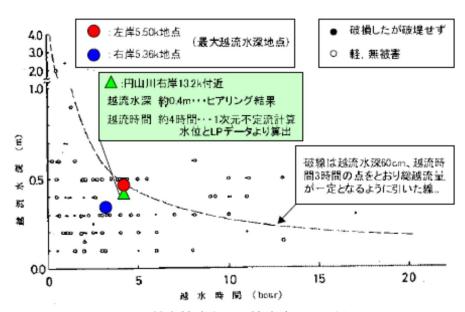


図4 最大越流水深と越流時間の関係2)

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ー解説編ー」(S59.3)¹²⁾を引用した最大越流水深と越流時間の関係図である図 4 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:75%が下になっている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4の解釈、取り扱いについては、本文の次章3(2)で考察するが、図4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高低は評価できない。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

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、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・洗堀破堤があり、①以外は"越流なき破堤"であるので、殊更な破堤とも言えない。



7月14日14:03



7月14日15:30



7月14日16:38

写真 3 破堤 (13:20) 後の推移 3): 破堤拡大停止 (想定 15:30)

図3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分の間とし、13:20頃と想定されている。また、計画高水位(HWL)を超え始めたのは8時頃とされているが、本文では図5から7:45と読み取る。その結果、破堤までのHWL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。

また、図 6 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 5 に追記したように、 $1.0 \text{m}/分 \rightarrow 0.67 \text{m}/分 \rightarrow 0.33 \text{m}/分 \rightarrow 0.17 \text{m}/分$ (平均:0.38 m/分)と推移(低下)している。これは、図 5 からも分かる通り、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7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。

以上から、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 $1.0\text{m}/分 \rightarrow 0.67\text{m}/分 \rightarrow 0.33\text{m}/分 \rightarrow 0.17\text{m}/分$ (平均 :0.38m/分)とする。

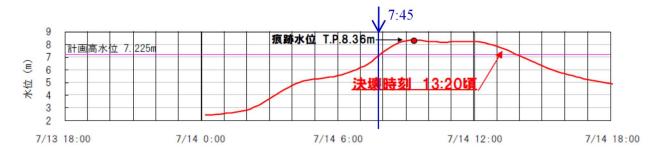


図 5 不等流計算による破堤箇所の河川水位の時刻歴:一部加筆 3)

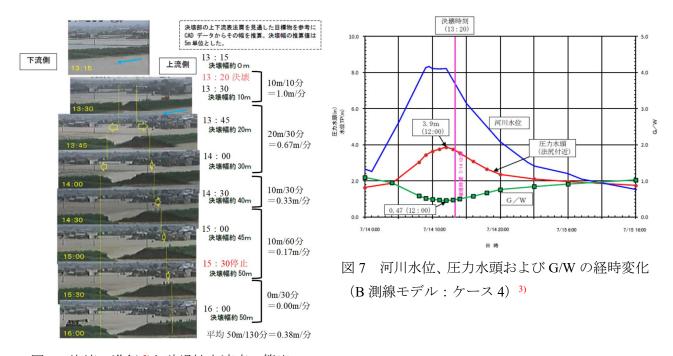


図 6 決壊の進行 3 と破堤拡大速度の算出

なお、事例 3 の破堤要因は、以下の通りとされている $^{2)}$ 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。

堤防被災原因は、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・陥没したものと推察される。

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、以下に留意するとされている(図8参照)⁴⁾。

- 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、値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。
- 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。

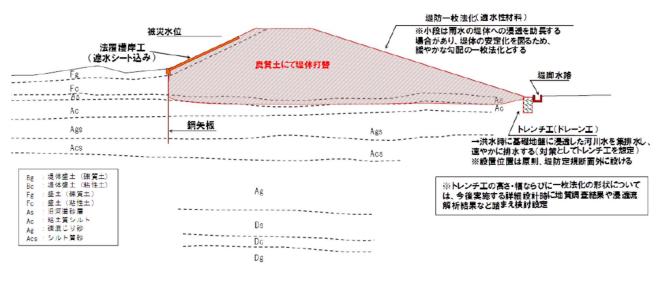


図 8 破堤箇所 (7.3k) の対策工法 (案) 4)

参考文献

- 3) 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.
- 4) 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、越流深はパトロール車の車体底部までの高さ(約20cm)が確認されている5,60。

また、図 5 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、HWL の超過継続時間は 5 時間とされている。

ここで、図 5 により、破堤地点では鎌庭地点から 23 分後の 12:23 に水位がピーク 6.65m に達した推算できる。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、時間当たりの水位上昇量は 0.21m 程度になる。従って、破堤地点も同様な上昇率とすると、12:10 から 12:23 までは 0.05m

増加、同様に水海道地点の水位変化からは 0.11m の増加と推察できる。以上から、破堤地点のピーク水 位時の越流深は25~31cm 程度と算定し、本文では31cm と想定する7。





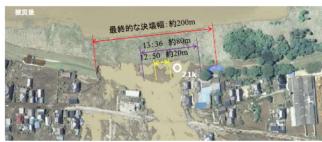
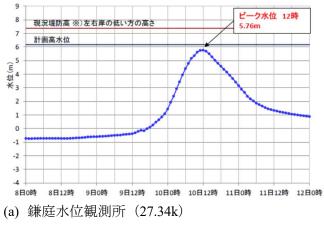


写真 4 越流開始(11:11)前後の状況 5

写真5 破堤幅の推移 5)



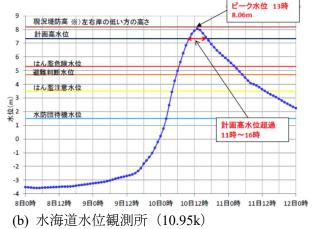


図 5 水位観測所の観測水位 5)

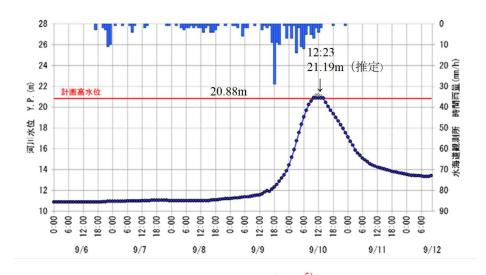


図 6 破堤地点の河川水位の算定 5 : 一部追記

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 7。なお、破堤箇所では、浸透流解析等により堤防の安全性の評価が行なわれている が、図6は外力とした河川水位である。同図には、HWLおよび破堤しない場合の水位のピーク値およ び時刻の推定値を追記してあるが、(時間軸が相当粗いが)破堤開始の12:52頃の水位はピーク直後の高 い水位状態にあると思われる。

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。以上から、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。以上から、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→

表1 越流開始、破堤開始から破堤拡大停止までの推移

1.0m/分とする。

時 刻 堤防状況	11:11(想定) 越流開始	12:52(想定) 破堤開始	13:36 破堤拡大	15:18 破堤拡大	16:19(推定) 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、以下の通りとされている⁶⁾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している。

- ・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をも上回り、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。

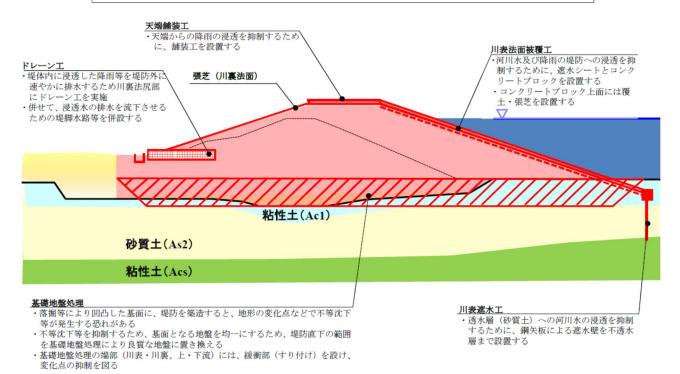


図7 本復旧工法(案)横断模式図*)

また、事例4の越流破堤箇所の本復旧に関して、以下が提起されている(要点抜粋、図7参照)⁶⁾。

- ・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

- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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*)。

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8)



写真7 破堤状況:10月14日10時ごろ8)

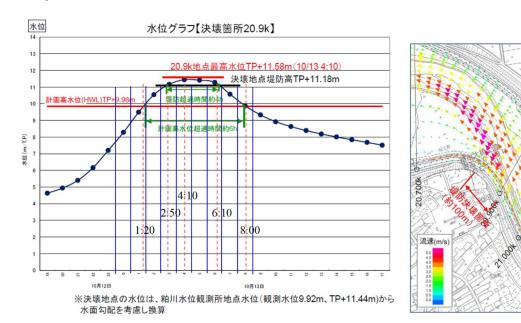
図 9 は、決壊地点の水位であり、粕川水位観測所の水位(観測水位 9.92m、TP+11.44m)から水面勾配を考慮して換算されている。同図から、計画高水位(TP+9.98m)の超過時間は約 6 時間、堤防高(TP+11.18m)の超過時間は約 4 時間とされているが、それぞれ1:20 から8:00(本文、読み取り)までの6時間40分ほどおよび2:50から6:10(本文、読み取り)までの3時間20分ほどである。また、4:10に最高水位がTP+11.58mであるので、越流深は最大で40cmになる。

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 $0.23m\sim0.33$ /分である。

ここで、事例 3 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 7)、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 9 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。

以上から、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 $\rightarrow 100$ m、破堤拡大速度は $0.23\sim 0.33$ m/分とする。



決壊箇所の水位⁸:原図に加筆 図9 再現計算による流速分布図⁹

表 2 吉田川右岸 20.9k の堤防決壊要因 9)

		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、「 <u>越水」</u> による洗堀が決壊の要因になったことが推定される。	0
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。 	ı
	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。 	ı
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。	-

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。 また、事例5の破場箇所の本復旧に関して、以下が提起されている(要点抜粋、図10参照)9)。

- ・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**(連接ブロック)、** 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。

ここで、事例 4 (鬼怒川) との差異は、上記の**太字**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に相当している。

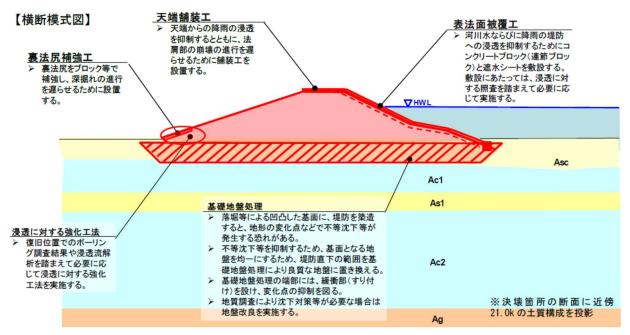


図10 本復旧の横断模式図 9)

参考文献

- 8) 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.
- 9) 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、桜づ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。







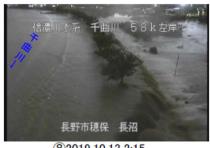
2019年10月13日 6:20년

撮影 2019年10月13日、10:00頃

写真 8 越流と破堤の状況 10,11): 左・6:20 頃、中・10:00 頃、右・13:10 頃







①2019.10.13 1:00 越水開始直後

82019.10.13 2:15

写真 9 破堤箇所に設置された CCTV の映像記録 10,11)

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。

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11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。

以上から、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、想定)、水位計で 3:50(同)である。なお、図 11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11から読み取った3:50を追記している。

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

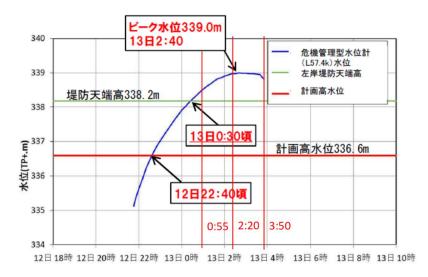


図 11 危機管理型水位計の記録 10,11)

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($0:55\rightarrow 3:50$)とする。

さらに、越流深は211 から 0.8m (=339m-338.2m) であるが、破堤の拡大停止時間が明記されていない。そのため、破堤拡大継続時間、破堤拡大速度は不明である。

以上から、事例 5 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である。

なお、当該箇所の決壊の原因は、表 3 の通り、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 10 。

決壊要因の可能性					
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。	×		

表 3 吉田川右岸 20.9k の堤防決壊要因 9

○:決壊への影響は大 ×:決壊への影響は低い

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が、以下の通りである(*は本文の追記、図 12 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。 *ドレーンの記述は特に無い、図にはある。
- ・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。

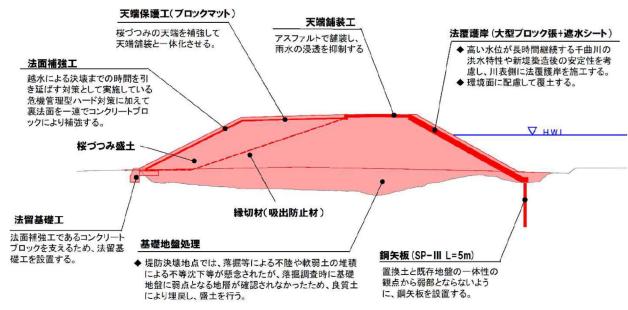


図 12 堤防決壊地点(左岸 57.5k 付近)の復旧断面(参考) 11)

参考

- 10) 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.
- 11) 千曲川堤防調查委員会:千曲川堤防調查委員会報告書、令和2年8月.

3. 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。

(1) 破堤事例の総括

表 4 は、事例 1 から事例 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。

衣 4 似定事例の順整加性胞などの比較例							
破堤	災害名	発生年月	破堤原因	越流開始時刻	越流継続時間	越流深	破堤拡大継続時間
事例	河川名	破堤箇所	堤防高	破堤時刻	破堤拡大停止時刻	破堤幅(推移)	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	_
争例1	円山川	豊岡市立野	6.9m	23:15	_	$30\text{m} \rightarrow 119\text{m}$	_
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	_
争7912	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
尹7913	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
事 7914	鬼怒川	常総市三坂	2~3m	12:52	16:19	$20\text{m} \rightarrow 200\text{m}$	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
争がりろ	吉田川	大郷町粕川	6m(特殊堤)	6:10~7:53	11:53	$20\text{m} \rightarrow 100\text{m}$	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	_
事 例 0	千曲川	長野市穂保	5m	3:50	_	70m	_
				•		* : 1.0→0.67→0	.33→0.17m/分

表 4 破堤事例の耐越流性能などの比較例

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の超過継続時間になる。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 13 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 14 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、鬼怒川以外は概ね 50m~120m 程度である。また、浸透破堤は 1 例だけであるが、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。

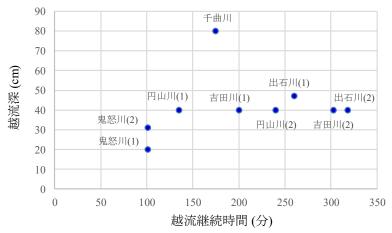


図13 越流深~越流継続時間の関係

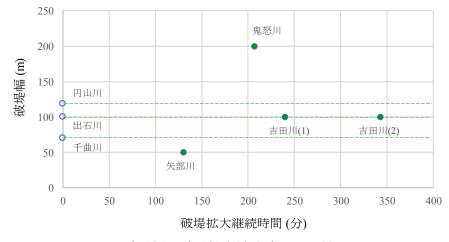


図 14 破堤幅~破堤拡大継続時間の関係

(2) 既往の越流事例との比較における考察

(2-1) 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 12)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、最大越流水深と越流時間を調べ、「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 15 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している。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、総越流水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%)としている。ここでの注意は、総越流水量とは、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、言い換えると、ある同じ越流流速と越流堤防延長の下での総越流水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している。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」としているが、「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思われる。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。

以上から、図 15 は本文の事例 2 の図 4 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 15 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 15 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。

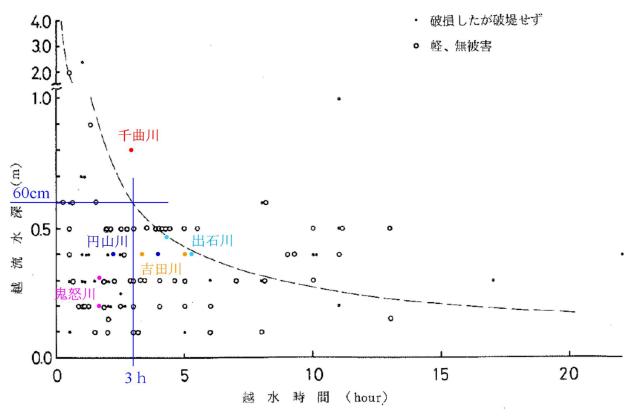


図 15 最大越流水深と越水時間: 文献 12 に加筆

なお、図13の越流破堤の5事例を図15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)総越流水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、出来ない。基本的に、図15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 15 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 16 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 16 により性能を評価する評価基準:閾値となる。ただし、図 16 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、難しさは残る。

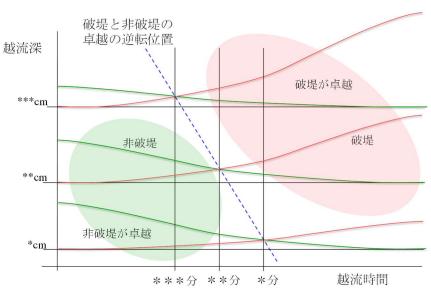


図 16 越流時間~越流深の関係における破堤と非破堤の卓越関係の概念例

(2-2) 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)」¹³⁾ (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 $y=1.6 \times (log_{10}300)^{3.8}+62=112$ 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 112m/2/60 分=0.93m/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 $4\sim10$ 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 $25\sim100$ m となり、 $10\sim30$ m 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、\$など)では上流方向に卓越している。

以上のように、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。

(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、以下の 4 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」
- ② 浸透破堤の場合の「HWL 超過から破堤までの HWL 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」

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。それぞれの視点は以下に示すが、どの視点により性能評価を行なうかは、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、前述の①「越流から破堤までの越流継続時間」あるいは「HWL 超過から破堤までの HWL 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、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、HWL 超過継続時間 ≧ 避難時間」により評価・判断を行なう。

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 \leq 目標破堤幅」あるいは「破堤拡大継続時間 \leq 目標破堤拡大継続時間」により評価・判断を行なう。

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」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・判断を行なう。

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。

	A. 破堤	B. 越流破場させない場合		
評価の	A-1 破堤の発生に対応	B. 燃侃収歩させない場合		
視点	一般的	基本構造を防護する粘り強さの実現		
	破堤までに避難させる	破堤の拡大を抑制する	越流しても破堤させない	
評価指標	越流継続時間、HWL超過継続時間 破堤幅、破堤拡大継続時間		耐破堤越流時間	
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)		天端高超過水位継続時間以上に延ばす	
評価基準	避難時間 目標破堤幅、目標破堤拡大継続時間		天端高超過水位継続時間	
姿勢	避難時間を短縮する	望ましい目標破堤幅を設定する 望ましい目標破堤拡大継続時間を設定する	越水時間を短縮する	
評価・	越流継続時間、HWL超過継続時間	破堤幅 ≦ 目標破堤幅	耐破堤越流時間 ≧ 天端高超過水位継続時間	
判断	≧ 避難時間	破堤拡大継続時間≦目標破堤拡大継続時間		
	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)	
対応策例	水防活動(諸対策*2)	水防活動 (諸対策*3)	水防活動(諸対策*2)	
	情報提供・タイムライン・避難誘導	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	避難施設の整備	嵩上げ(水防活動)	
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・基礎地盤の引	_		
	*2:侵食・漏水・亀裂・崩壊の防止			

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

参考

- 12) 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-解説編-、土 木研究所資料 第 2074 号、1984.3
- 13) 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

4. まとめ

本文の事例の検証および考察により、以下の知見が得られ、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としては、①「越流から破堤までの越流継続時間」、②「HWL 超過から破堤までの HWL 超過継続時間」、③「破堤幅」、④「破堤拡大継続時間」、⑤堤防自身の「耐破堤越流時間」が考えられる。①および⑤は「耐越流性能」、②は「耐浸透性能」、③および④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、HWL の超過時刻、 越流開始時刻、越流停止時刻、破堤時刻、HWL 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、必ずしも系統的に整理されていない状況にある。そのため、今後の被災(特 に、破堤) 堤防の堤防調査では、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・洗堀破堤があり、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から、さらに将来的な破堤の予防を図る ことができる。

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。

以上