

2015年9月関東・東北豪雨による 鬼怒川の越流破堤要因および 模型実験による粘り強い堤防構造の検討

常田 賢一¹¹ (一般財団法人) 災害科学研究所 (〒565-0871 大阪市高麗橋4-5-13)

本文は、2015年9月の関東・東北豪雨により越流破堤した鬼怒川の堤防について、現地調査に基づいて、堤内地の落堀による浸水流速の増加が、堤防の侵食、破堤区間の拡大の一要因であることを指摘している。さらに、上記の浸水被害を受けて、堤防技術検討小委員会は越流に対して粘り強い堤防構造として、天端舗装、裏法尻のブロック設置を例示したが、本文は、現地調査に基づいた越流対策の考え方を提示するとともに、その具体化策として“かご工”に着目し、期待される粘り強さ機能を想定し、越流模型実験により検証した結果を報告する。

キーワード 洪水、越流破堤、現地調査、室内実験、粘り強さ、越流対策、かご工

1. はじめに

2015年9月8日から10日にかけて、関東地方では台風18号によって刺激された秋雨前線の降雨に加え、台風から変わった温帯低気圧と台風17号により、鬼怒川上流域では線状高水帶と呼ばれる状況になり、長時間にわたり強い雨が降り続いた。その結果、10日の12:50頃、左岸21km地点の常総市三坂地区において、堤防が約200mにわたり決壊し、甚大な浸水被害が発生した¹⁾。

本文は、越流により上記の破堤箇所の堤内地に形成された落堀に着目し、越流破堤さらに破堤の拡大との係わりを考察する。また、現地調査などから越流に対する粘り強い堤防構造を整理する。さらに、治水対策検討小委員会²⁾は、上記の浸水被害を受けて、越流に対して粘り強い堤防構造として、天端舗装、裏法尻のブロック設置を例示したが、本文では、具体的な越流対策として“かご工”に着目し、越流模型実験により裏法尻の越流に対する粘り強さの向上性を検証する。

以上の結果、落堀が越流破堤と破堤拡大に深く関係すること、“かご工”的な技術的な可能性が得られた。

するとともに、落堀に着目した現地調査に基づいて考察して、得られた知見を報告する³⁾。

(1) 越流、破堤、浸水の状況

調査委員会の資料に基づくと、越流、破堤および浸水の基本的な状況は、以下のように整理できる。

a) 破堤地点の堤防高

破堤地点は堤防高 Y.P.20.88m、地盤高 Y.P.18.00mであり、堤防高は2.88m、ほぼ3mである。なお、Y.P.（江戸川工事基準面）は Yodogawa Peil の略であり、江戸川堀江の水量標の0を基準とした江戸川、利根川、那珂川等の水位の基準である（Y.P.=T.P.+0.84m）。

なお、上流 160m 地点（堤防高 Y.P.22.08m）と下流 120m（同 Y.P.21.13m）地点の間で、堤防の天端高が線形的に推移していると仮定すると、破堤地点の天端高は0.66m低かったと推察される。



写真-1 12:10頃の越流状況¹⁾

2. 破堤・浸水状況と落堀に関する現地調査と知見

洪水および越流、浸水に関しては、鬼怒川堤防調査委員会（以下、調査委員会）の調査結果¹⁾の多くを参考に

b) 破堤地点のピーク水位とその時刻および越流深

写真-1は12:10頃の越流の状況であるが、越流深は浅く、天端からパトロールのライトバンの車体底部までの高さ（約20cm）が確認されている。さて、破堤箇所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）では、水位のピークは13時に8.06mである。従って、破堤地点（21.0k）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と推察される。

よって、12:10頃の20cm程度の越流深は、ピーク水位の12:23頃に、20cmより増加し、破堤の12:50頃まで越流が続いたことになる。ここで、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、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増加したと推察される。同様にして、鬼怒川水海道地点の水位変化からは0.11mの増加になる。

以上から、破堤地点のピーク水位時の越流深は、 $20\text{cm} + 5\sim 11\text{cm} = 25\sim 31\text{cm}$ 程度であり、最大でも0.3~0.5m程度と推測される。

c) 越流開始の時刻と越流継続時間

国土交通省の職員、情報把握員、河川巡視員の聞き取り、写真によると、遅くとも11時11分に越流が開始し、12:05時点では破堤していないと推察される。また、破堤地点の対岸にある篠山水門のカメラは、破堤の開始に気が付いて撮影開始したとされ、その時刻は12時52分16秒である。そのため、破堤の開始を12:52頃として、越流開始を11:11とすると、破堤開始までの越流の継続時間は1時間40分程度と推測される。

d) 破堤の進行継続時間と浸水が停止した時刻

破堤の経緯は、12:50頃に20mが決壊し、13:36に80m

に拡大し、最終的に200mに拡大したとされる。その途中、破堤箇所の近傍で撮影された写真および15:18の空撮の写真-2によれば、13:27~15:18までの破堤幅がほぼ同じ程度であり、15:40では14:16よりやや下流側に侵食が拡大している。

従って、少なくとも、破堤開始の12:50から15:40までの2時間50分の破堤の範囲は、写真-2のGSの北側の80mの区間の付近に止まり、GSの南側（下流側）の破堤の拡大、進行はしていないと推測される。

その後、破堤区間の下流端の侵食が進行し、破堤は拡大を続け、GS背後の木立は流出し、破堤区間が200m付近まで拡大したが、想定水位の時刻歴によると、水位はY.P.20m程度に低下しているので、破堤幅80mから200mまでは39分の経過であり、80mまでより破堤の拡大は早かったと推察される。

以上から、破堤の進行継続時間は3時間30分程度であり、その後、河川水位の低下により浸水の勢いは低下し、10日の22:00頃に堤内地盤高のY.P.18mに達した時点で、堤内への浸水は止まったと推察される。

従って、破堤の進行終了後の堤内地への浸水時間は、16:19から22:00までの5時間40分程度であり、堤内地への浸水継続時間は、11:11から22:00までの10時間50分程度と推測される。

e) 堤内地への浸水、侵食状況

浸水による堤内地の地盤の侵食、落堀の形成は、浸水状態（浸水方向、浸水時間など）に左右される。写真-2から、以下の侵食状況が推察される。

- i) 流れ①と②が波立って勢いよく流入し、これらの流れに当る現地盤の侵食、落堀の形成が顕著となった。
- ii) 破堤区間の中央部の流れ③が緩やかなのは、ゾーンIの侵食が僅かであったからである。これは、浸水終了後の堤防底面の地盤の残留からも分かる。



写真-2 15:18の破堤状況：国土交通省関東地方整備局の提供／追記は著者による

- iii) 堤内地での浸水の主たる流れは、流れ④と⑤であるが、破堤の初期に流れ④が先行したため、流れ④の流路の侵食が顕著であり、測量の結果からも分かる。その後、南側に拡大し、復旧延長の201mに至った。
 - iv) 破線⑥は県道357号であり、流れが乱れているが、道路を越流して落水している。従って、15:18時点では、道路の決壊箇所の舗装は残留していたと思われる。
 - v) ゾーンIIの流れは穏やかな状態にあり、測量結果あるいは浸水終了後の現地の状況からも分かるが、侵食は軽微なゾーンである。
 - vi) ガソリンスタンド(GS)の南側は、写真-2の15:18以降、侵食が拡大し、浸水するが、北側よりも⑦の浸水が遅れたため、堤内地の侵食、落堀の形成もGSの北側と異なり、小規模に止まった。そして、GSおよびその南側の道路の舗装は残留した。
 - vii) 初期の破堤延長は20mとされ、この破堤後は、破堤区間に隣接する堤防での越流は無く、浸水による上下流の破堤断面の侵食により、破堤が拡大している。
- 以上のように、浸水の流向を左右する要因は、堤防の拡幅部、立木、住宅などがある。例えば、写真-2で堤内地の上流向きの流路④の形成原因是、破堤区間の下流端付近にあるGS背後の堤防拡幅部、倉庫が浸水による侵食に粘り強く抵抗したためと推察される。

(2) 落堀の形成特性と破堤、拡大の関係

堤防の越流、さらには破堤による浸水により堤内地の地盤は侵食され、大規模な落堀が形成されている。現地調査では、落堀の形成状況の把握と水深の簡易計測を実施し、洪水による落堀の諸特性を把握した。

a) 落堀の形成状況

写真-3は9月16日の破堤地点付近であるが、幅150m、堤内地に形成される落堀の分布は一様ではなく、浸水の流向、その継続時間などに応じて主たる流路が形成され

る。延長400m～500mほどの範囲に、浸水痕、つまり落堀が形成されている。水が溜まっている部分は特に深掘れした箇所であり、浸水方向に細長く、落堀は卓越して形成されている。本文では、浅く広がる侵食を一次侵食(面)、さらに深い侵食を二次侵食と呼ぶ。

10月3日に侵食、言い換えると落堀の深度の把握を実施した。滞水域である二次侵食箇所(写真-4)の水深は、釣竿で重りと浮子を付けた釣り糸を投げ入れて計測した。計測した水深に水面と一次侵食面の比高差、一次侵食面と侵食前の地表面の比高差を加算して侵食深を算出した。計測結果は図-1であるが、最深部は4.9mであり、その分布から落堀の形成特性などが推察できる。



写真-3 堤内地の落堀：関東地方整備局の提供／追記は著者



写真-4 堤内地に形成された落堀：9月26日

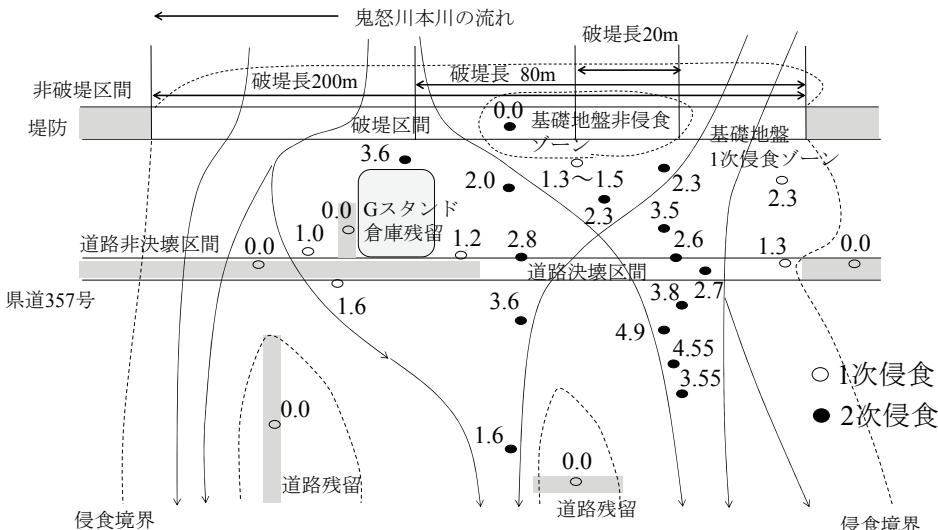


図-1 落堀(一次侵食および二次侵食)の深度の計測結果：10月3日

b) 落堀と越流破堤、拡大の関係

破堤初期の延長 20m 規模の破堤後は、破堤区間に隣接する堤防での越流は無く、破堤区間の上下流端の堤防側面の侵食により、破堤区間が拡大したと推察される。内地に落堀が形成されるのに伴って、河川水位との落差が増加し、それにより浸水の勢いが増加し、堤防の侵食、破堤拡大が助長されたと推察される。

3. 現地調査などによる越流対策の考察

洪水時の破堤は浸透破堤と越流破堤に区分でき、従来は前者に対する対策が主であったが、鬼怒川の越流破堤を受けて、後者に対する対策の必要性が堤防技術検討小委員会²⁾で謳われ、認識が高まったと言える。本文は、越流破堤に関して具体化を試行するが、浸透は越流破堤にも関わることに注意、配慮が必要である。

越流破堤に対する基本姿勢は、レベル 2 津波の対策と同様に、想定以上の出水による越流に対して“粘り強い”堤防にすることである。前章の現地調査によると、越流破堤・浸水に対する減災のための堤防の粘り強さには、以下の 2 つの視点が必要である。

視点 1：破堤させないあるいは破堤を遅らせること。

視点 2：破堤後、破堤幅の拡大を抑制すること。

ここで、堤防調査委員会では視点 2 までは言及していないが、破堤拡大が浸水量に直結するので重要である。

(1) 越流破堤・破堤拡大抑制の対策の一般化

現地調査³⁾、加えて類似の津波越流に対する対策⁴⁾⁵⁾を参考にすると、視点 1 による破堤抑制策は、図-2 のように考えることができる。

i) 堤内の不飽和化・浸潤面の低下

近年、浸透破堤の抑制のために、堤内地側の法尻にふとんかごを設置することが多くなったが、法尻部だけでなく、50cm 程度の層厚の碎石ドレン層を堤体の奥まで敷設することが行なわれている。本文では、“堤内基盤ドレン工”と呼ぶ。津波の越流に対する河川堤防の難侵食性を参考にすると、日頃から“堤体内的含水量、浸潤面の低下”を図り、洪水時にも浸潤面上昇を遅らせること、言い換えると、“不飽和化”により越流侵食に対しても堤体を粘り強くすることが期待できる。

ii) 天端補強による難浸透化・裏法侵食の抑制

鬼怒川の出水でも堤防天端の舗装の効果が指摘されたが、越流に対する粘り強さを向上させるために、堤防天端の補強が考えられる。

具体的な構造として舗装があり、治水対策検討小委員会²⁾も越流対策として例示しているが、従来から、さらに津波越流³⁾でも侵食抑制の効果は認識されてきている。また、津波を模擬した水路越流実験⁴⁾⁵⁾により、舗

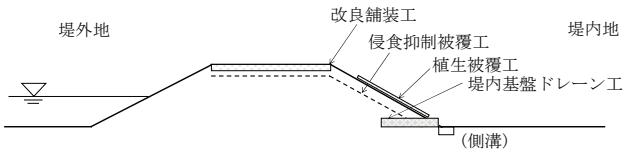


図-2 堤防を越流に対して粘り強くする構造例³⁾

装が裏法から天端に拡大する侵食を抑制することが分かっている。ここで、一般的なアスファルト舗装に止まらず、構造を工夫（改良）して、裏法の侵食を抑制することが考えられるので、本文では“改良舗装工”と呼ぶ。
iii) 裏法面の難侵食化

津波の越流に対する法面植生の効果を参考にすると、越流が発生する前から、越流による侵食に対して裏法面の抵抗性を高くしておくことが有効であり、以下のような方法が考えられる。

方法 1：裏法の表層下をジオテキスタイルなどで被覆し、強化して侵食を抑制する。本文では、“侵食抑制被覆工”と呼ぶ。

方法 2：出水期は、裏法面の草本類を繁茂させる。植種の選定・開発が必要であるが、葦、笹類は抵抗性が高いと思われる。この場合、地元の理解が必要である。本文では、“植生被覆工”と呼ぶ。

方法 3：裏法の緩傾斜化により侵食代（=侵食断面の余裕）を設定する。本文では、“堤防断面拡大工”と呼ぶ。高規格堤防は具体策であるが、鬼怒川の破堤からは、部分的な断面拡大の効果も期待できる。

iv) 裏法尻の難侵食化

越流により、法尻の侵食が引き金になり、裏法、天端、さらに表法に侵食が拡大する。従って、法尻部の侵食抑制が必須である。ここで、治水対策検討小委員会²⁾は、裏法尻部でのブロックの設置を例示しているが、ブロックだけの設置では侵食を増長する恐れがあるので、注意が必要である⁴⁾。

次に、視点 2 の破堤拡大抑制策は、殆ど議論されていないが、出水時対応と事前対応に区分できる。前者には、何らかの浸水抑制措置があり、後者には、既存技術としての裏法尻付近に設ける“樹林帯”が相当すると思われ、部分的な堤防断面の拡大も考えられる。

以上の他、水防活動による越水防止・抑制策として、土のうによる嵩上げ（高さ：30～50cm）、土のうの代替構造・装置の設置などがある。

(2) かご工による粘り強さ機能

洪水時に図-2 の天端舗装が越流に対して裏法の侵食抑制機能を発揮していると、河道の水位上昇、越流により発生する現象は図-3 で想定できる。つまり、堤内の浸透と浸潤面の上昇、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。

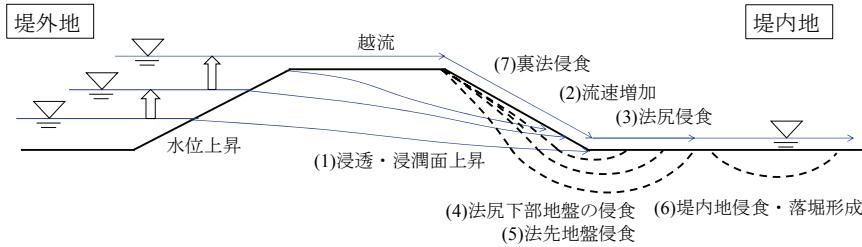


図3 河道の水位上昇と越流により発生すると想定される現象

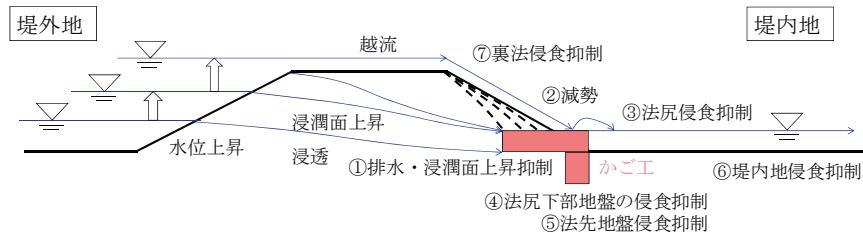


図4 浸透・越流に対するかご工の粘り強さ機能

これらの現象の対策策として、図4の裏法尻部とその下部にかご工を設置する構造を考える。これにより、図3で想定した現象は、それぞれ以下のように対処できるので、堤防の粘り強さの向上が期待できる。

- ①排水（ドレン）機能による浸潤面上昇の抑制
 - ②かごの緩衝による越流水の流速抑制（減勢）
 - ③④によるのり面・法尻の侵食の抑制
 - ④⑤による法尻下部地盤の侵食の抑制
 - ⑤⑥による法先地盤の侵食の抑制
 - ⑥⑦による堤内地の侵食・落堀の形成の抑制
 - ⑦かごの存在による堤体の侵食拡大の抑制
- 以上内の内、“かご工”は越流水の減勢と法尻・法尻下部地盤・法先地盤の侵食抑制が主要な機能と考えられる。

4. 越流に対するかご工の粘り強さの模型実験

前章(2)で提示した“かご工”について、越流水の減勢および法尻・法尻下部地盤・法先地盤の侵食抑制に着目した室内小型模型実験を実施し、粘り強さを検証した。なお、本文は実験の一部の報告であり、研究発表会において総括する。

(1) 実験方法

図5は実験模型（盛土高100mm、基礎地盤厚150mm、奥行き100mm、法勾配1:2）であり、天端はアクリル板で被覆して舗装を模擬し、越流時に侵食が卓越する裏法～法尻～法先地盤を再現する。ここで、法肩からの法面侵食ではなく、法尻部の侵食を先行させるために、図6のように法肩から法面の中央までをアクリル板で被覆して越流水を法尻に誘導し、法尻部の侵食の再現に特化する。

堤防模型と基礎地盤模型の土質材料は、2mm以下にふるい分けした笠間砂（粘性土質砂／砂分82.1%・シルト

分12.5%・粘土分5.4%，最大乾燥密度 1.78g/cm^3 ，最適含水比14.4%，土粒子密度 2.67 g/cm^3 ）であり、締固め度90%（乾燥密度 1.60 g/cm^3 ，含水比8.80%）で作成する。

本文の実験は、無対策と図6のかご工設置の2ケースである。碎石を詰めたかご工模型（写真5、長さ100mm・幅100mm・高さ20mm、密度 1.63g/cm^3 ）の中心を法尻に合わせて設置する。かご工の盛土内の埋設部分は吸出し防止材を巻く。越流は、図5の右側からのポンプの給水（約 $1.3 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$ ）で行い、左方向への流水は貯水し再循環する。越流（天端の越流深：2cm程度）による盛土、基礎地盤の侵食状況は、土槽の側面と法面の正面からの動画撮影し、写真判読する。

(2) 実験結果

写真6および写真7は、それぞれ無対策およびかご工設置について、越流開始15秒後の越流、侵食状況である。同時間経過で、写真6（点線が初期断面）では法尻、法先地盤が侵食しているが、写真7では越流水がご工で緩衝され、法先地盤の侵食が見られず、かご工設置の効果

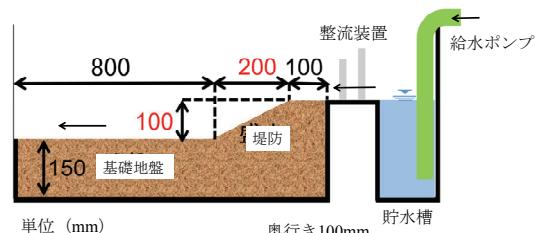


図5 越流実験模型の概要

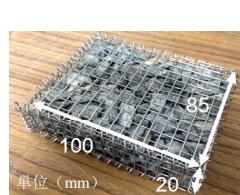


写真5 かご工模型

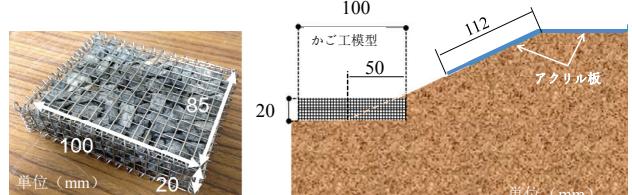


図6 かご工の設置：水平敷設例

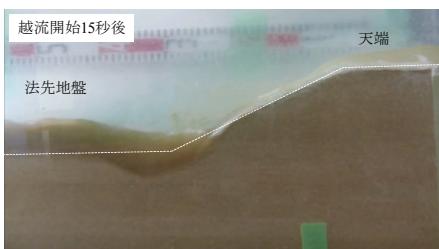


写真-6 無対策の越流状況：越流開始 15 秒後

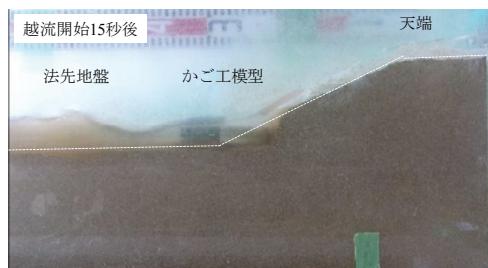


写真-7 かご工設置の越流状況：越流開始 15 秒後

(粘り強さ) が示唆される。

また、図-7(a)および(b)は、それぞれ無対策およびかご工設置について、越流開始から 60 秒間の堤防および基礎地盤の侵食の推移である。同図から、かご工が無い場合、越流開始の 30 秒後において、基礎地盤は 60 秒後とほぼ同じ 40mm 程度の深度まで侵食しているが、かご工がある場合は、30 秒後では 20mm 程度の侵食深に留まるとともに、その後の侵食も徐々に進行しており、かご工による侵食抑制が伺える。

ここで、全体的な侵食深や侵食範囲では、かご工の有無により大きな差異が無いように見えるが、これは写真撮影が側面からという実験上の制約のためである。つまり、側面の状態が奥行き方向の侵食を代表していない、つまり、土槽の側面とかご工の隙間への浸水により、かご工周りの侵食の増長が伺え、かご工の残留状況からは、中央部の侵食は側面ほど進行していないと思われる。従って、図-7 の実験結果の解釈に注意が必要であるが、それでもかご工の効果は示唆されている。

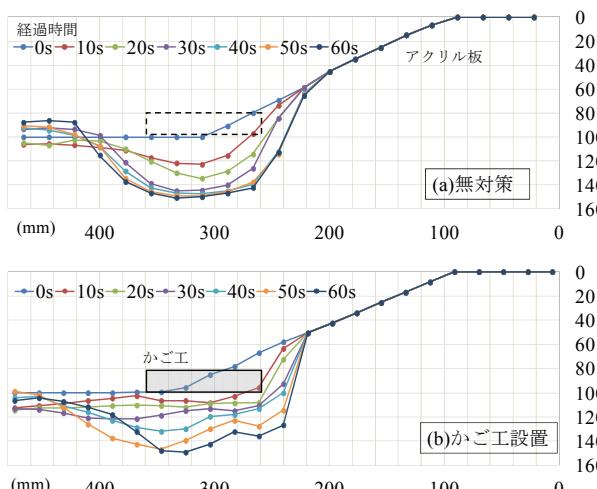


図-7 かご工設置の有無による侵食の推移の比較

5. まとめと課題

鬼怒川の越流破堤・侵食状況および落堀調査、さらに越流対策に関する検討の結果、以下の知見が得られた。

- 1) 破堤初期の延長 20m 規模の破堤後、破堤区間に隣接する堤防での越流は無く、破堤区間の上下流端の堤防側面の侵食により、破堤区間が拡大した。
- 2) 堤内地に落堀が形成されるのに伴って、河川水位との落差が増加し、それにより浸水の勢いが増加し、堤防の侵食、破堤拡大が助長された。
- 3) 堤防の越流対策では、津波と同様に、堤防の“粘り強さ”向上を基本とすることが有効である。
- 4) 堤防の“粘り強さ”は、破堤させない・破堤を遅らせる“破堤抑制”だけでなく、破堤後、破堤幅の拡大を抑制する“破堤拡大抑制”も必要である。
- 5) 越流の破堤抑制策には、堤内の不飽和化・浸潤面の低下、天端補強による難浸透化・裏法侵食の抑制、裏法面の難侵食化、裏法尻の難侵食化などがあり、破堤拡大抑制策には、樹林帯、部分的な堤防断面拡大などがあるが、今後、具体的な技術開発が必要である。
- 6) 越流破堤には、堤内浸透も関わり、複合的な要因の考慮が必要である。
- 7) 越流対策例として“かご工”を提示し、排水による浸潤面上昇の抑制、越流水の緩衝による減勢、法尻・法尻下部地盤・法先地盤・堤内地の侵食の抑制が期待できるが、越流模型実験により減勢・法尻・法尻下部地盤・法先地盤の侵食抑制の可能性が示唆された。

謝辞：現地調査では、日本テレビ放送網（株）報道局社会部の牧尾太知氏と（一財）災害科学研究所の支援、室内実験では、（株）共和ハーモテックの協力を得ている。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：第 1 回鬼怒川堤防調査委員会（平成 27 年 9 月 28 日）、第 2 回鬼怒川堤防調査委員会（平成 27 年 10 月 5 日）、第 3 回鬼怒川堤防調査委員会（平成 27 年 10 月 19 日）の資料。
- 2) 国土交通省：第 1 回大規模氾濫に対する減災のための治水対策検討小委員会（平成 27 年 10 月 30 日）の資料。
- 3) 常田賢一：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による鬼怒川の破堤箇所の現地調査による知見と考察、一般財団法人 災害科学研究所平成 27 年度災害等緊急調査報告書、平成 27 年 10 月 13 日。<http://csi.or.jp/>
- 4) 常田賢一・谷本隆介：2011年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性、土木学会論文集B2（海岸工学）、Vol.68, No.2, P0014, 2012.
- 5) 常田賢一・秦吉弥：2011年東北地方太平洋沖地震の津波から学び 粘り強い盛土で減災、理工図書（株），2016.4.