平成 27 年 9 月関東・東北豪雨において鬼怒川他支川 で生じた破堤現象と落堀について

THE CAHARACTERISTICS OF LEVEE-BREACH PHENOMENA AND SCOURED REGION OF THE KINUGAWA RIVER AND SOME BRANCHES OF TONEGAWA RIVERS AT KANTO & TOHOKU HEAVY RAIN IN SEPTEMBER 2015

田中規夫¹・八木澤順治²・五十嵐善哉³・山岸玄弥³ Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Yoshiya IGARASHI, Genya YAMAGISHI

 「正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)
²正会員 博(学) 埼玉大学大学院准教授 理工学研究科・(兼)埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)
³学生会員 工学士 埼玉大学大学院 理工学研究科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

For clarifying the scoured characteristics around levee breaching point at the 2015 Kanto & Tohoku heavy rain, post flood survey was conducted not only for the Kinugawa River but other rivers in Ibaraki Prefecture where levee breaching was occurred, and the breaching length and the depth of the scoured region were investigated with the hydraulic parameters. Flume experiment was also conducted in a flume with 1/60 scale. The levee shape were selected as the full shape and the half-scoured levee shape. Clear water scour condition was set at the downstream of the levee. The number of scoured region for the full shape levee condition were around 5-8, and is similar to the actual situation at the breaching point of the Kinugawa River. The scoured depth for half scoured levee shape was 1.5-1.8 times larger for full-size embankment case. The breaching widths for Miyato, Nishinire, and Hachikenbori River, were relatively small, but was similar to the initial breaching width of the Kinugawa River.

Key Words : levee breaching, scoured region, instability of overflow phenomenon, post disaster survey

1. はじめに

平成27年9月関東・東北豪雨における茨城県内の河川の 被害状況については、茨城県災害対策本部の報告しによれば、 利根川水系の16河川で,決壊5箇所,越水22箇所,漏水3 箇所, 鬼怒川水系の6河川で, 決壊2箇所, 越水15箇所, 漏水3箇所(国土交通省の報告2)における鬼怒川堤防の漏水 地点を考慮すると21箇所),法崩れおよび法すべり4箇所, 那珂川水系4河川で,越水4箇所,漏水1箇所であった. 大規模出水時において、堤防の破堤に至る過程とその機構 を把握することは、今後の防災・減災対策上、非常に重要 である.特に堤防越水に伴う法尻付近の洗掘は,堤防の横 断面や長手方向の洗掘現象の時間的進行や破堤流量にも関 係する. 東北地方太平洋沖地震津波時に被災した阿武隈川 右岸周辺の法尻付近や平成27年9月関東・東北豪雨の鬼怒 川破堤地点付近では、複雑な洗掘形状が確認されている. こうした洗掘形状を決める要因としては、越流水深と堤防 高さの比, 越流幅等があげられる.

本研究では、2015年の豪雨で河川の破堤氾濫が生じた鬼 怒川だけではなく、宮戸川・西仁連川・八間堀川の破堤事 例も含め、破堤現象のメカニズム、破堤幅や破堤部の洗掘 領域の長さなどの基礎データを水理量と関連付けることを 目的とする.また鬼怒川21km付近の複雑な洗掘形状について、水理模型実験も含めて破堤直前の洗掘領域の堤防長手 方向の数やその深さに関する知見を得るものである.

2. 研究方法

(1) 災害後の現地調査

a) 調査対象エリアの降雨状況

今回調査を実施した河川流域近傍のアメダスデータ³⁾より,降雨状況を調べたところ,越水が確認された向堀川・女沼川,決壊が確認された宮戸川に近い茨城県古河市の古河観測所では9月8日から10日の間の72時間雨量が296.5mmと非常に多くの降水量があったことが確認された.また,決壊・越水が確認された西仁連川や飯沼川に近い茨城県坂東市の坂東観測所では、9月8日から10日の間の72時間雨量が264.0mmと,古河観測所よりも少ないものの,同様に多くの降水量があったことが確認された.

b) 調査方法の概要

茨城県内では複数箇所で堤防の決壊が生じた.特に, 鬼怒川の決壊地点(21km付近)において形成された複雑 な落堀(本論では破堤後に生じた流れによる洗掘領域も

論文

含む)の形成状況に関連し、その形成メカニズムを既往 災害や他河川の現象と比較し深く理解するために、茨城 県内の4河川において現地調査を実施した.決壊地点の 位置図を図-1に示す.表-1に調査項目と一部結果を示す (水理模型実験の条件に関係するため、一部の結果も含 む).堤防特性として、堤防高(裏法尻から天端までの高さ)

を調査した.堤防高については、現地において堤防の決 壊断面を撮影した画像より把握した.また、決壊の規模・ 決壊後に形成される洗掘特性については、堤体の決壊幅、 裏法尻周辺に形成された洗掘長(堤防に対して直角方向に 形成される落堀の長さ)を調査した.これらのデータの取 得に関しては、現地での直接計測および UAV を用いた空 撮を復旧工事の状況に応じて使い分けて実施した.

(2) 現地調査データの解析手法

現地調査より得られた破堤被害データを既往知見と比 較するため、以下の3項目について整理した.

a) 越流幅と堤防長手方向の落堀個数との関係

Afreen⁵は2011年の東北太平洋沖地震時に、河川堤防 上を越流した津波によって形成された落掘形状に着目し て水理実験を実施している.その中で、越流によって形 成される堤防長手方向の落掘個数が、越流幅と堤防高と の比、堤防裏法尻でのフルード数によってある程度把握 できることを指摘している.災害後に比較的容易に定量 的な情報が得られる落掘の深さや個数等のデータは、堤 防の越流規模を推定できる可能性があるため、重要であ る.今回、鬼怒川の破堤点においても堤防長手方向に複 数の落掘が形成されていたことから、同様の整理を実施 し、比較を行なった.

b) 堤間幅と破堤幅との関係

氾濫シミュレーションマニュアル案[®]では,過去の破堤 データから,堤間幅と破堤幅との関係が整理されている. その図面に4河川での堤間幅と破堤幅のデータを追加し, 比較を行なった.また,鬼怒川堤防委員会資料[®]より,破 堤幅の時間的進行状況とも比較を行った.

表-1 調査項目と結果

河川名	破堤地点名 (図-1中の記号)	堤間幅(破堤地点)	堤防高	破堤長	洗掘長
		(m)	(m)	(m)	(m)
鬼怒川	а	400	3	200	190
八間堀川	b	15	3	12	₩2
	с	15	3	20	45
	d	15	3	18	55
西仁連川	e	18	2.7	18	50
宮戸川	f	10.5	₩1	12	₩1
西仁連川 宮戸川	d e f	15 18 10.5	3 2.7 ※1	18 18 12	50 ※1

※1:復旧工事のためデータ取得できず

※2: 越流背後の大型構造物の影響を受けていたためデータ取得せず

c) 堤防天端でのエネルギー水頭と洗掘長との関係

Tanaka and Sato[¬]は、2011年の東北太平洋沖地震津波に より阿武隈川をはじめとする複数河川において、河川遡 上津波の越流によって形成された落堀を対象に、堤防天 端でのエネルギー水頭と洗掘長との関係を整理している。 同論文では、堤防が破堤していない状態で形成された洗 掘長を対象としているが、完全に破堤した場合に形成さ れる洗掘長を評価する場合におけるエネルギー水頭の適 用性と破堤の有無による相違について確認した。

(3) 水理模型実験

鬼怒川破堤点(21km 付近)で生じた現象を理解するため, 平面水路に移動床と堤防モデル(1/60 スケール)を図-2 のように設置し,破堤地点と相似の条件で越流水深を設 定して,水理模型実験を行った.河川堤防模型は,越流 初期として洗掘以前の形状I,裏法面が天端中央付近まで 洗掘された形状IIの2つを考慮した(表-2).また本実験 では,堤防長手方向の流れの変化を再現するため,水路 幅 188cmの中央(幅 80cm)に形状IまたはIIの堤防模型 を配置し,その両側(幅 54cm ずつ)に形状Iの堤防模型 の天端を2cm嵩上げした形状IIIの堤防模型を配置するこ とで,中央(幅 80cm)を越流部とした.ここで,堤防模 型高さ:5cm,堤防天端:6cmとし,洗掘前の堤防法面勾 配は川表:4割勾配,川裏:3割勾配とした.鬼怒川21km 付近の破堤地点での想定越流水深(約 20cm)および,堤 防高と堤外地盤高の比高(約 2-3m)のデータもから,越



図-1 破堤防地点の位置図と被害状況 (a) 鬼怒川⁴, (b) 八間堀川(上大橋上流), (c),(d) 八間堀川(大橋上流), (e) 西仁連川, (f) 宮戸川



図-2 定常流水路越流部の縦断面図



		川表	川表
Case I-3	3	4	3
Case I-5	5	4	3
Case II-3	3	4	0(直角)
Case II-5	5	4	0(直角)

流水深を落差(堤防高-堤内地盤高)で除した無次元越 流水深は約0.07-0.1である.本実験では、第一段階として 調査データと類似のケースを想定し、無次元越流水深を 0.06,0.1(越流水深はそれぞれ3,5mm)とした.実験ケ ースの一覧を表-3に示す.

越流時間は、落堀の形状が変化しないことを確認して から、さらに3分程度越流させた時間(10~15分程度) とし、その際の底面形状を終局形状と判断した.

移動床部分(落堀が生じる区間)は、堤防法尻における当該水理条件で静的洗掘が生じるような材料(d_{50} =4.5mm)を敷き詰めることとした。また移動床部分は飽和状態とし、浸透の影響が生じないようにした。また、堤外からの浸透流が影響しないよう堤防上流側には適度な浸透を起こさせる遮断壁を設け、上流側を浸水させ下流側の移動床部分が飽和した段階で越流を開始するよう、ポンプの制御を行った。越流後のポンプ流量は固定した。

越流前後の移動床高さを、レーザー変位計(Keyence LK-500)によって計測し、その差から落堀形状を把握し た.計測数に関しては、越流前の砂面は水平としている ため、法尻背後の15点のデータの平均とした.越流後の 砂面計測に関しては、基本的に1cm平方で計測を行った. ただし、落堀の形成されていない部分は、必要最低限の 計測とした. 欠測部分に関しては、線形補間を行った.

3. 研究結果および考察

(1) 現地調査結果

a) 鬼怒川と八間堀川

八間堀川は2015年9月19,20日,鬼怒川は2015年9 月19日に現地調査を実施した. 八間堀川では, 図-1 に示 す3箇所で破堤が確認され、各地点において表-1に示す データを調査した. 図-1(b)に示す地点では、破堤地点の 堤内側に大型構造物があり,洗掘長に影響を及ぼした可 能性があるため洗掘長を取得しなかった.映像や現地と アリングより、鬼怒川の越流氾濫では越流水深と堤防高 の比が小さく、決壊前に堤防断面が半分程度削られて自 由水脈が形成されるような環境下で川裏側法尻付近の洗 掘現象が生じる等,破堤状況は複雑であった.鬼怒川の 破堤点では、大規模な復旧工事が実施されており十分な 調査が実施できなかったものの、破堤幅、洗掘長などの データは災害直後に撮影された航空写真 4から推定した. 図-3 に破堤点近傍で注目した落堀の写真を示す. 矢印で 示した箇所付近は越流初期に洗掘が生じた領域であるが, 長手方向約70mの区間に5個の落掘が形成されている.

八間堀川では,破堤が確認された3箇所において,堤 防高,決壊幅,洗掘長を調査した.上大橋上流(八間堀川 b 地点)での決壊の状況を図-1(b)に示す. この地点の堤防 高が約3m, 決壊幅は12m程度であった(この地点では, 決壊地点の堤内側に大型構造物があり、洗掘長に影響を 及ぼした可能性があるため、洗掘長を取得しなかった). この地点がいつ決壊に至ったかについては情報が不足し ており詳細は不明であるが、右岸側も含めた流れの痕跡 を確認したところ、左岸側から堤内地へ越流したものと 考えられる.決壊地点の周辺も含めて調査したところ, 約 200m 上流においても左岸側から堤内地に越流した痕 跡(堤防上および堤内地の植生の倒伏状況)が確認されて いる.一方,八間堀川b地点の1.5km下流の大橋下流(八 間堀川 c, d 地点:堤防高 3m, 図-1)では、2 箇所の決壊 がみられた. c, d 地点の決壊幅はそれぞれ 20m 程度, 18m 程度であり,洗掘長はそれぞれ45m,55m程度であった. この地点では、周辺の痕跡の状況から、左岸側から堤内 地への流れだけではなく,右岸側から八間堀川へ流入し た形跡が確認され、氾濫流の状況が八間堀川 b 地点とは 異なっていた、このことは、鬼怒川の決壊地点からの氾 濫流が八間堀川の右岸側から流入したことで、左岸側の 堤防の決壊につながった可能性があることを示唆してい る.

b) 宮戸川と西仁連川

西仁連川と宮戸川(図-1)については、2015年9月12日 に調査を実施した. 宮戸川では復旧工事が実施されてい たため、データを取得することはできなかった. 宮戸川 では、決壊後数日経過した状態であったにも関わらず、 図-1(f)に示すように背水によって決壊地点の下流から 逆流が生じている状況が確認された.特に,決壊地点の 対岸側(右岸側)が大きく侵食されていた.出水時に背水影 響を強く受ける場合,決壊地点では,決壊後に上流だけ でなく下流からの逆流も生じる.順流と逆流が合流する 箇所では,上下流から流れが集中し,大きな渦が形成さ れることで対岸側の堤体を大きく侵食した可能性がある.

西仁連川では、堤防高が約2.7m,決壊幅は8mおよび 18m,洗掘長は50m程度であった.西仁連川ではすでに 河道内の水位が低下しており、実際に逆流が生じている 状況は確認できなかったものの、河道内の植生の倒伏方 向、決壊地点近傍の右岸側に堆積していた土砂の堆積形 態から逆流が生じていたと推察される.

これらのことから,2河川とも破堤前後に背水の影響を 強く受けた状態であったことがうかがえる.こうした地 点では,破堤後に上流および下流側の双方から流れが集 中するため,図-1(e)や図-1(f)に示すように決壊箇所が 2箇所形成され,その間の堤体の一部が島状に残存する という特徴的な破堤形態が確認された.

(2) 既往災害との比較:破堤現象の類似性と相違性

落掘長と堤防天端のエネルギー水頭との関係を,破堤 しなかった場合の既往研究[¬]と比較して示す(図-4).ま ず,破堤により落堀長は10倍程度まで広がることが見て 取れる.エネルギー水頭の増加に伴い,落堀長はある程 度は頭打ちになる傾向はあるが,上昇傾向を示している. 破堤しない場合と値は大きく異なるものの,トレンドは 類似している.なお,破堤の場合のデータが不足してお り,一般化するためには堤内地盤の強度やアスファルト 被覆状況なども含めて整理することが望ましい.

今次調査(4河川)の最終破堤幅と鬼怒川 21km 地点 の破堤幅の時間的進行を,氾濫シミュレーションマニュ アル案 @の図面に加筆して,図-5 に示す.背水影響を強 く受けた宮戸川・西仁連川や,鬼怒川の氾濫水が流入し 破堤した八間堀川の最終破堤幅は傾向としては小さかっ た.一方,鬼怒川の最終破堤幅は大きい値となったが, 初期破堤幅は宮戸川・西仁連川・八間堀川と類似してお り,堤防高が同程度の場合,類似した値をとることが示 唆された.12:52の初期決壊幅は支川と類似した 20m で あったが,最終破堤幅には大きな違いが生じた.また, 多くの堤防越水に伴う破堤地点に共通して形成された島 状地形(鬼怒川でも越流初期に生じていた)が維持され るかどうかも最終破堤幅に大きな影響を与えることが分 かった.最終破堤幅は氾濫の継続時間(指標として川幅) が大きく関係していることが示唆された.

(3) 水理模型実験結果

各ケースにおける落堀形状(地盤高コンター)を,図 -6に示す.ここで,堤防長手方向にX軸をとり越流部中 央を基準 (X=0)とした. また,縦断方向にY軸をとり堤防法尻を基準 (Y=0)とし,流下方向を正とした. Case I-3 および Case I-5 に関しては,堤防長手方向に関しては,越流幅 80cmの両端に5cm ずつ拡幅して,幅90cm にわたって計測を行った. Z[cm]は洗掘深であり,負の値は洗掘,正の値は堆積を表す.また,凡例に関して,細礫の大きさを考慮して,洗掘深 Z[cm]が±0.3cm 以内の場合は誤差とし,それ以下を洗掘部,それ以上を堆積部とした.



図-3 注目した堤防長手方向の落掘(既往報告4)に加筆)



図-4 落掘長と堤防天端のエネルギー水頭の関係(白抜きプロットは未破堤箇所(自由越流)⁷,黒プロットは未破堤箇所(もぐり越流)⁷,赤プロット:今次災害)



図-5 4河川の最終破堤幅と鬼怒川21km地点の破堤幅の 時間的進行(氾濫シミュレーションマニュアル案^のの図面 に加筆)



図-6 各ケースの落堀形状コンター図(X:堤防長手方向(越流部中央を基準),Y:法尻からの距離)

a) 堤防形状が維持された場合(Case I-3, I-5)

Case I-3 では、あまり洗掘が生じていないが、詳細に見ると、堤防長手方向に6個(実線)から8個(点線の境界部含む)の落堀が見られる.最大洗掘深は-0.82cmであった. Case I-5 では、越流中央と両端に大きめの落堀が形成され、堤防長手方向には5個(実線)から7個(点線の境界部含む)の落堀が形成された.堤防形状維持の2ケースにおいて、落堀の個数に関して鬼怒川21kmの破堤地点の現象と類似している.

b) 天端中央付近まで洗掘された場合(Case II-3, II-5)

Case II-3 および II-5 に関しては,越流直背後の両側部 に堤防 III があるため,越流幅 80cm 内で計測を行った. 自由流脈による洗掘深(Case II-3, II-5)は,堤防形状が維持 された場合(Case I-3, I-5)と比較して大きい.落堀は連続し ているが,最深部に着目すると,堤防長手方向に 8~14 個程度の小規模落堀が形成されている.鬼怒川破堤付近 の個数や Case I と比べると数が多い.最大洗掘深は越流 水深 3,5mm においてそれぞれ-1.21, -1.6cm であった.

本実験において,自由流脈(Case II-3, II-5)による最大 洗掘深は堤防形状が維持されたとき(Case I-3, I-5)の洗 掘深の約1.5-1.8倍であった.また,水路模型実験(縮尺 1/60)より,自由流脈による洗掘深は現地スケールで約 0.8-1.0mであったが,鬼怒川破堤点における落堀の最終 深さは5mであった.既往研究⁷⁾より推定すると,2m前 後の深さとなる.これらの差については次節で考察する.

(4) 水理実験と現地災害の類似性

越流初期(初期堤防形状)を想定した既往実験⁹における落堀形状と流れの関係を図-7 に示す.鬼怒川 21kmの堤内地側の堤防高 3m に対して越流水深は 0.2m(越流水 深/堤防高さ = 0.07)と浅いため,既往実験では図-7(b)に相当する流れが,本実験の Case I でも形成された.越流初期の堤防長手方向の落掘個数は,越水した流れが有限幅で側壁が固定されていない三次元的な跳水を起こすときに,跳水部分の上下動に伴う不安定性の結果と推定される.一方,越流により堤防が半分削られた状態を想定した水理実験(前節)では,自由越流部の長手方向の不安定性によって生じると考えられ,別の不安定現象である.そのため落掘個数は同じではなく 8-14 個と多く形成された.

既往災害時のエネルギー水頭と最大洗掘深の関係 [¬]よ り,落差 2-3m で越流水深が 0.2m の場合は鬼怒川決壊前 の洗掘深は 0.2-1.5m 程度と予想された. しかし,最終洗 掘深 5m とは大きな差があり,最終洗掘深には破堤後の流 れが大きく影響していることが示唆された. しかし,長 手方向の落掘個数は,洗掘前の断面形状における水理実 験 Case I と同数程度が,現地においても確認されている ことから,破堤前の落掘に破堤後も流れが集中し,個数 がおおむね維持されたものと推定される.



図-7 越流部に形成される落掘, (A) 無次元越流水深 =0.25 - 0.4, (B) 無次元越流水深 = 0.1 - 0.2, (無次元越流 水深 = 越流水深 / 堤防高) (Afreen⁵より引用)



図-8 堤防長手方向の落掘個数(Afreen⁹に鬼怒川 21km 付近航空写真⁴から推定した個数,本実験データを追加)

なお、カスリン台風時の利根川・栗橋地点の決壊やS61 年の小貝川決壊では大きな洗掘領域は長手方向に1つし か形成されなかった.しかし、今回の鬼怒川では破堤が 生じたのにもかかわらず、5個の落掘が長手方向に形成さ れたのは、堤防天端がアスファルト舗装されており、天 端の高さが維持されたまま、高い位置水頭で薄い越流水 深が長く続いたことも影響していると考えられた.堤防 天端が越流時に下がり、越流水深が大きくなる場合には、 既往研究 ⁵から推定すると規模の大きいひょうたん型の 落掘が形成されると考えられる.

4. 結論

本調査で得られた主な結果は以下の通りである. 1)鬼怒川の破堤点付近の破堤前の現象は、ひょうたん池が 出来るような規模の越流水深ではなかった.落掘個数は、 既往研究⁵⁰や本実験 Case I との比較で 5-8 個程度であり、 航空写真かから推定される個数(5個)とも類似している. 2) 堤防半断面の Case II においては、長手方向に 8-14 個 と鬼怒川 21km 地点の個数よりも多い落堀が形成された. 判断面状態の不安定現象は発達せず、初期の洗掘領域が 川側に掘れながら移動したと解釈される.そのため、長 手方向の落堀個数は越流幅/堤防高と初期堤防断面特性 (Case I)でおおむね表現可能である.

3)宮戸川,西仁連川,八間堀川,鬼怒川ともに越流が二股 に分かれる現象が確認された.流速が遅くよどんだ状態 での決壊の共通した現象として注目される.堤防高が初 期破堤幅に大きく影響すると推定される.

4)最終破堤幅は鬼怒川を除いて、小さめの値となった.鬼 怒川は越流・決壊の過程で間の島状地形は消滅したこと、 河川からの氾濫水の供給が続いたため、破堤幅は他地点 と比べて大きく、文献のより大きい値であった.

謝辞:本研究の一部は、2015年関東・東北豪雨災害 土木 学会・地盤工学会合同調査団関東グループの調査として 行なわれ、関係機関に多大なご協力をいただいた.2015 年度河川整備基金助成事業(2015年関東・東北豪雨災害 調査,代表:山田正)、2015年度科学研究費補助金(特別 研究促進費,代表:田中茂信)の補助を受けた.ここに記 して謝意を示す.

参考文献

- 茨城県水害対策本部:台風 18 号等による本県への影響に ついて, 2015.9.14. (参照 URL:http://www.pref.ibaraki.jp /1saigai/201509/bousai09141100.html)
- 国土交通省:統合災害情報システム DiMAPS, 急速に発達 する低気圧に伴う暴風雨等, 台風 21 号による大雨等, 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨等に係るこれまでの被害状況, 2015.9.30 (参照 URL: http://www.mlit.go.jp/river/bousai /dimaps/index.html).
- 3) 気象庁:アメダス(茨城県),(参照 URL: http://www.jma.go.jp/jp/amedas/).
- 国土交通省 鬼怒川堤防調査委員会:第3回鬼怒川堤防委 員会資料,2015.
- 5) Afreen, S.: Investigation of equilibrium scour pattern after levee overtopping, 埼玉大学大学院博士学位論文, 2016.
- の 栗城稔,末次忠司,海野仁,田中義人,小林裕明:氾濫シ ミュレーション・マニュアル(案) -シミュレーション の手引き及び新モデルの検証-,土研資料,3400 号,1996.
- Tanaka, N., Sato, M.: Scoured depth and length of pools and ditches generated by overtopping flow from embankments during the 2011 Great East Japan Tsunami, Ocean Engineering, 109, pp.72-82, 2015.

(2016.4.4 受付)