

2015 年関東・東北豪雨災害における鬼怒川の堤防被災状況の把握と そのメカニズムの検討

Field Survey on Levee Breach in the Kinu-gawa River by Kanto-Tohoku Heavy Rainfall Disaster, 2015
and Study on the Failure Mechanism

二瓶泰雄（東京理科大学）
Yasuo NIHEI（Tokyo University of Science）

1. はじめに

1.1 気象概況及び気象情報発表状況

2015 年 9 月に接近・来襲した台風 17, 18 号に伴って、西日本から北日本の広い範囲で大雨となり、全国で死者 8 名、家屋被害約 2 万棟という甚大な被害が発生した¹⁾。中でも栃木県・茨城県を流れる鬼怒川では堤防決壊・溢水が発生し、広範囲の洪水氾濫が発生した。

台風 18 号は 2015 年 9 月 7 日に沖ノ鳥島の東海上で発生し、その後北上し、9 日 10 時には愛知県渥美半島に上陸し、同日 15 時には日本海に抜け温帯低気圧となった（図 1 (a)）。この台風 18 号と温帯低気圧、同時発生していた台風 17 号により、南からの温かい湿った空気が流れ込んだ影響で、幅 100~200km の南北に伸びた線状降水帯が、関東地方と東北地方に形成された²⁾。図 1 (b)に示すように、この線状降水帯は、鬼怒川上流域と重なり、600 mm以上の二日間雨量が栃木県日光市で観測された。これらの雨量の再現期間としては、3 日間積算（421mm）・2 日間積算（403mm）・1 日間積算（330mm）においてそれぞれ 95 年、138 年、237 年となっており、相対的に短期間の降水ほど再現期間が長くなっている³⁾。

このような状況下において行われた気象情報などの発表状況を取りまとめたものを図 2 に示す。これは、気象庁の災害時気象報告⁴⁾に基づいて、災害の発生した茨城県常総市を例に表示している。ここでは、大雨

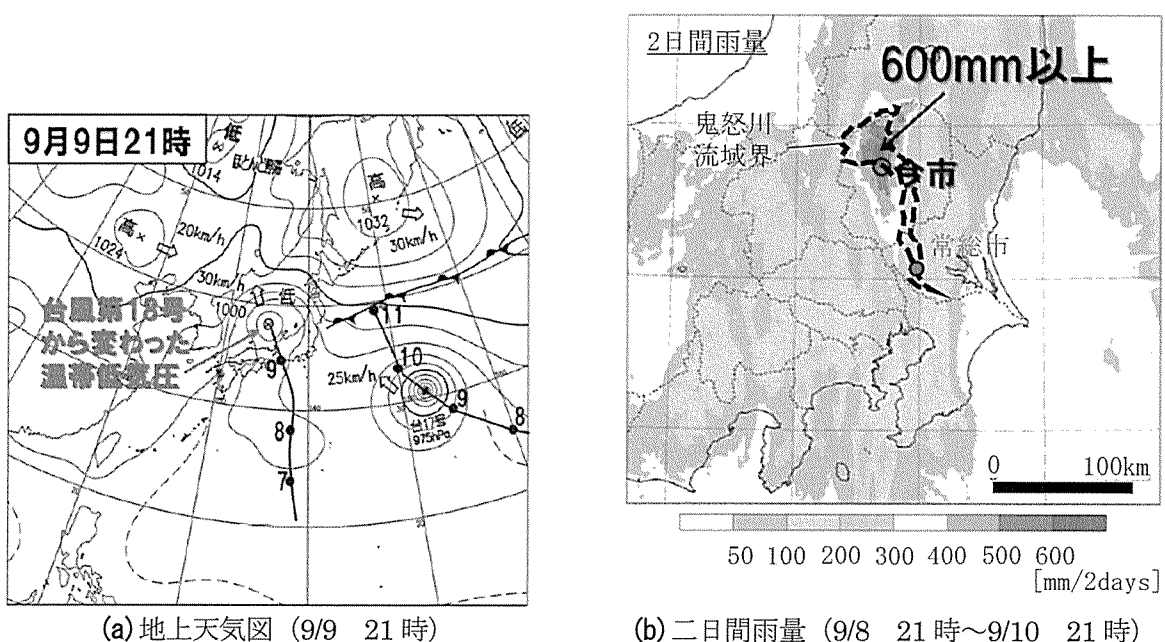


図 1 気象概況²⁾

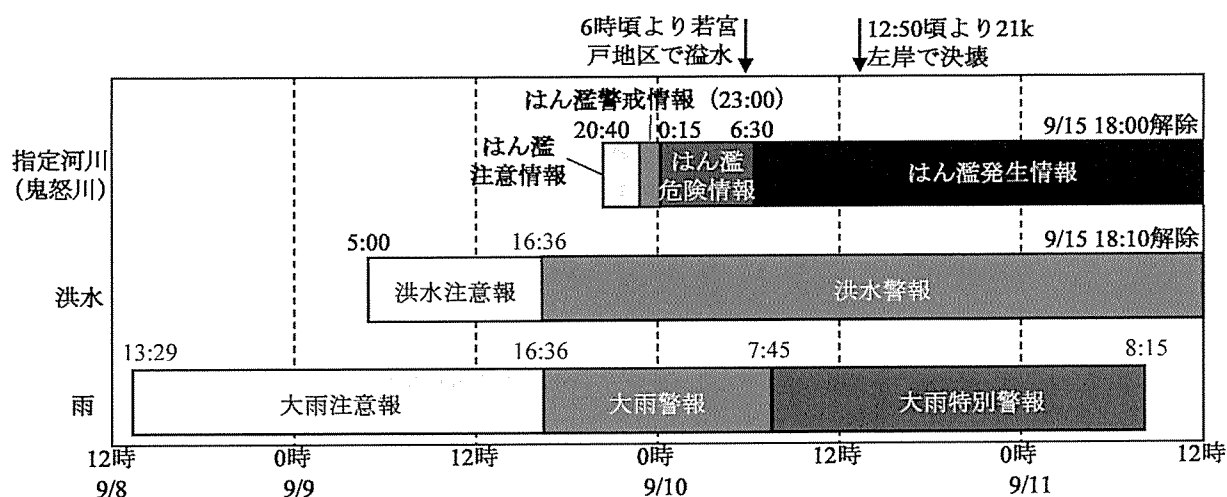


図2 気象情報等発表状況（茨城県常総市）⁴⁾

表1 人的・物的被害の概要（内閣府資料¹⁾，平成28年2月19日現在）

都道府県	人的被害[人]				住家被害[棟]					非住家被害[棟]	計[棟]
	死者	行方不明者	重症	軽傷	全壊	半壊	一部破損	床上浸水	床下浸水		
宮城県	2		1	2	2	572	298	138	727	2	1,739
山形県			1					13	17		30
福島県					2		6	43	163		214
茨城県	3		3	51	54	5,486		185	3,767		9,492
栃木県	3		1	5	22	964	29	1,102	3,934	153	6,204
埼玉県				3			2	374	1,482		1,858
千葉県							1	33	109		143
他			2	11			7	37	154	3	201
全国	8		8	72	80	7,022	343	1,925	10,353	158	19,881

と洪水，指定河川である鬼怒川のはん濫情報も記載している．これより，茨城県常総市では，9/8 13:29に大雨注意報が発令され，大雨警報は翌9日 16:36に発表された．また，洪水注意報は同日 5:00，洪水警報は16:36にそれぞれ出された．指定河川・鬼怒川では，9/9 20:40にはん濫注意情報，同日23:00にはん濫警戒情報，翌10日 0:15にはん濫危険情報が出された．その後，同日6時ごろに鬼怒川左岸25.35k付近の常総市若宮戸地区にて溢水が発生し，6:30にはん濫発生情報が出された．その後，茨城県全域に大雨特別警報（土砂災害，浸水害）が7:45に出されると共に，8:00にはん濫発生情報（上記若宮戸地区に加え，筑西市船玉（左岸44.1k付近），筑西市伊佐山（川島橋）（左岸45.9k付近））が出された．12:50頃には鬼怒川左岸21k付近（三坂町地区）にて堤防決壊が発生し，再びはん濫発生情報（左岸21k付近よりはん濫）が出された．このように鬼怒川における溢水や決壊により大量の氾濫水が鬼怒川左岸に流入し，茨城県常総市にて広域の浸水被害が発生した．

1.2 人的・物的被害

表1は，全国における人的・物的被害をまとめたものである（内閣府¹⁾，H28年2月19日現在）．このように，全国では，死者8名，重傷者8名，軽傷者72名の人的被害を受け，また物的被害としては，全壊80棟，半壊7,022棟，一部損壊343棟，床上浸水1,925棟，床下浸水10,353棟であり，住家・非住家の被害合計が19,881棟となった．このうち，茨城県・栃木県合計の人的被害は死者6名，重傷者4名，軽傷者56名，物的被害は，全壊76棟，半壊6,450棟，一部損壊29棟，床上浸水1,287棟，床下浸水7,701棟となっており，被害が顕著になっていることが分かる．牛山⁵⁾は，2015年関東・東北豪雨の被害状況を我が国で

表2 河川構造物の被害状況（鬼怒川は国交省⁶⁾の情報を記載、他の河川は国交省⁷⁾より集計）

	国管理						県管理河川			
	利根川水系				那珂川水系	荒川水系	茨城県	栃木県	埼玉県	千葉県
	鬼怒川	利根川	小貝川	他	那珂川他	都幾川				
決壊	1			0			8	4		
溢水	7	2		0			4	10	8	
越水	0			0		1	17	1		
漏水	23	1		0			4	0		
法崩れ・すべり	7	2	7	2			126	8	2	
堤防・河岸洗掘	31	6	3	5	54		0	0	1	2
その他	28	1	7	9	3		0	1	2	

生じた1999～2014年における災害データと比べ、死者・行方不明者8名はほぼ毎年発生する頻度であるが、家屋被害は数年に一度程度の頻度であると述べている。

1.3 鬼怒川での被害状況^{6), 7)}

2015年関東・東北豪雨災害における大きな特徴である河川構造物の被害状況の全体像を取りまとめたものを表2に示す。ここでは、関東地方を対象に、国管理河川では利根川水系（鬼怒川、利根川、小貝川、その他）や那珂川水系、荒川水系、県管理河川では主な被害が見られた茨城県、栃木県、埼玉県、千葉県についてまとめて表示している。被害内容としては、堤防決壊、溢水、越水、漏水、のり面崩れ、堤防洗掘、河岸洗掘、その他に分類されている。これらの結果は、国交省や県が発表している資料に基づいてまとめたものである^{6), 7)}。これより、河川被害としては、国管理河川では鬼怒川が、県管理河川では茨城県が、最も被害が大きいことが分かる。被害項目としては、決壊は鬼怒川1か所、県管理河川のうち茨城県で8か所、栃木県で4か所において発生した。この鬼怒川の決壊は関東地方の一級河川では1986年に生じた小貝川での決壊以来29年ぶりである¹⁾。また、溢水や越水も各河川で生じていた。数の上では、のり面崩れや堤防・河岸洗掘が多いが、漏水が鬼怒川に集中的に発生した。また、利根川本川でも溢水が2か所で生じていた。鬼怒川流域と隣接して流れる小貝川では、今次災害ではほとんど被害が発生しておらず、のり面崩れなどが生じるに留まった。

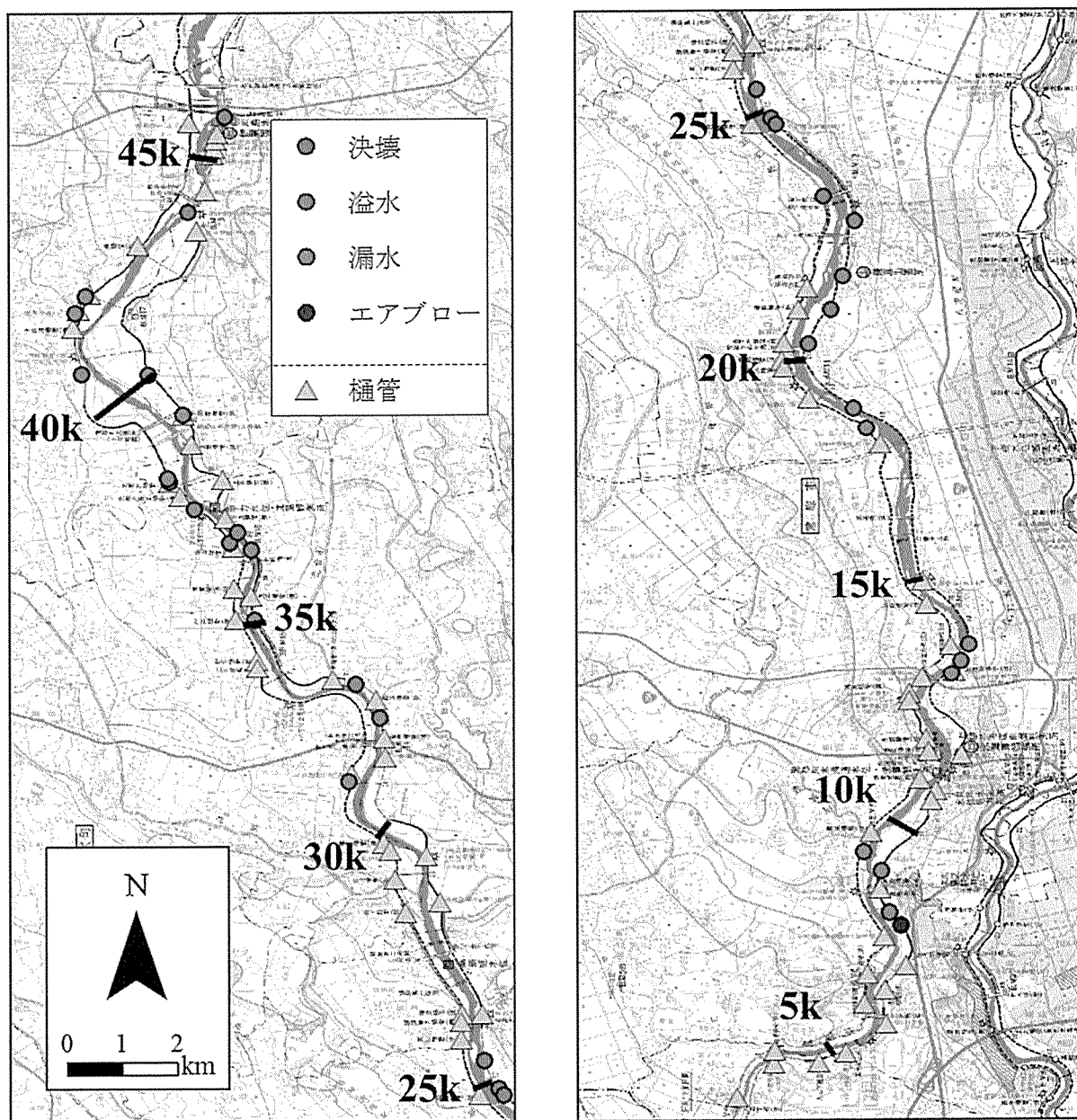
鬼怒川では観測史上最大の洪水流量となり、決壊1箇所（三坂町地先、21k地点左岸）と7箇所の溢水、また、下流域を中心に堤体・基盤の漏水が多発した。特に、若宮戸地区（25.35k、24.75k左岸）において大規模に溢水し、三坂町地区（21k地点左岸）では越水し、その後12時50分頃に決壊した。この氾濫によって茨城県常総市が浸水し、その氾濫面積は常総市の約1/3の面積に相当する約40km²にわたり、市災害対策本部が設置された常総市役所も孤立した。この鬼怒川下流域における一般被害状況として、全国で死者8名中、鬼怒川下流域常総市では死者2名であった。住家被害は常総市に集中的に発生しているものの、沿川の結城市、筑西市、つくばみらい市でも大きな被害が生じた。避難指示・勧告等は最終的には約3万4千人に出されたが、避難の遅れ等により多くの住民が取り残された。結果的に、ヘリによる救助者数1339人、地上部隊による救助者数2919人、合わせて約4,300人に上った。破堤氾濫の流勢の強さと共に、氾濫による湛水が、道路冠水による交通の遮断、関東鉄道常総線の停止、停電、断水、情報通信の途絶を引き起こしたことも、多くの救助者を生んだ要因の1つと考えられる。また、40km²にわたる広域の浸水が発生したため、国土交通省の全国の地方整備局の応援により、決壊当日（9/10）からポンプ排水が行われた。その結果、約780万m³の排水が実施されたが、宅地や公共施設の浸水の解消には9/19までの約10日間も要した。

1.4 本報の目的

本報では、上述したように甚大な被害に見舞われた鬼怒川の洪水氾濫を助長した堤防被害に着目し、その全体像や決壊状況の調査結果を取りまとめるとともに、鬼怒川堤防の決壊状況検証を意図した室内実験について記述する。なお、本報は、「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」による平成27年9月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書⁸⁾に記述されたものをベースとして記述されたものである。

2. 堤防被災状況の全体像

最も大きな被害を受けた鬼怒川における河川堤防の被害状況マップを図3に示す。ここでは、国交省の調査結果⁶⁾に基づいて、決壊・溢水・漏水・エアブローの発生日点を鬼怒川・小貝川管内図にプロットしている。これらの被害は鬼怒川の46kより下流域のみに起こったため、該当部分の地図のみ図示している。また、



(a) 25k～46k

(b) 3k～25k

図3 鬼怒川における河川堤防の被災状況マップ

漏水地点との比較のために、樋管・樋門などの位置も表示している。これより、鬼怒川における堤防決壊は1箇所（21k左岸，常総市三坂町地先）であり，ここでの被災状況や決壊プロセス，そのメカニズム検討用の実験等の詳細は4章において記述する。溢水は7箇所（45.9k左岸筑西市伊佐山地先，44.1k左岸筑西市船玉地先，40.6k右岸結城市上山川地先，32.8k左岸下妻市前河原地先，25.35k左岸及び24.75k左岸若宮戸地先，23.1k右岸常総市向石下地先）で発生した。エアブローは1箇所（7.75k左岸）であり，堤防天端のアスファルト舗装に生じた割れ目からエアブローが確認された（図4）。漏水は，全部で23箇所が発生しており，発生地点は7k～41kと広範囲にわたっている。



図4 エアブロー発生地点（鬼怒川 7.75k 左岸）

堤防被災箇所と，鬼怒川の河道縦断形及び川幅の縦断変化を図5に示す。この図は，第二回鬼怒川・小貝川有識者会議資料⁹⁾を修正・加筆したものである。川幅に関しては，中心軸から右岸・左岸側の低水路・堤防位置が分かる形で表示している。これを見ると，河口より45k付近を境にして河床勾配が大きく変化している。具体的には，河床勾配は45kより上流側では1/800～1/200となっている一方，45kより下流側では1/2000～1/1000となっており，この45k付近が河床勾配の変化点となっている。次に，川幅に関しては，45k付近よ

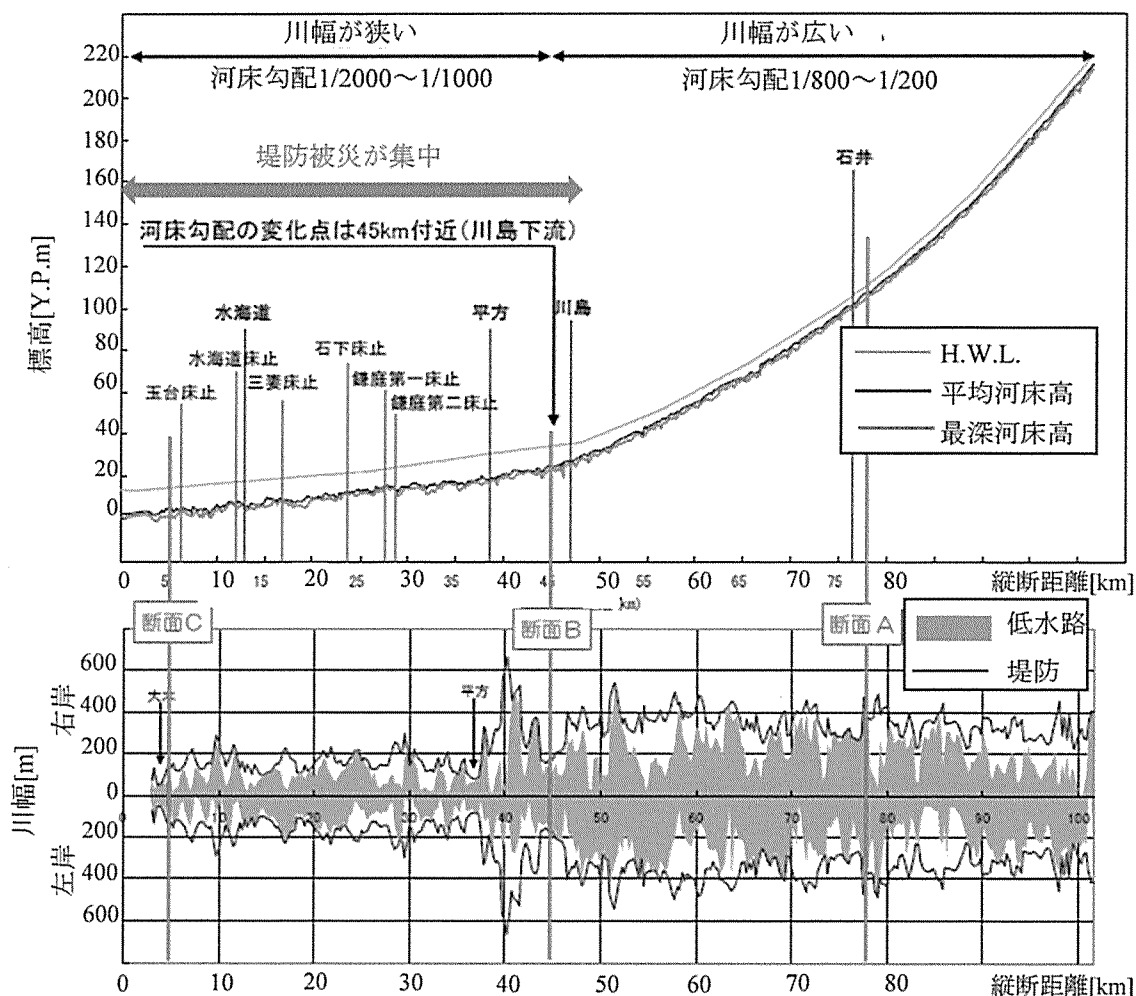


図5 鬼怒川における河道縦断形状（上）と川幅の縦断変化（下），堤防被災位置

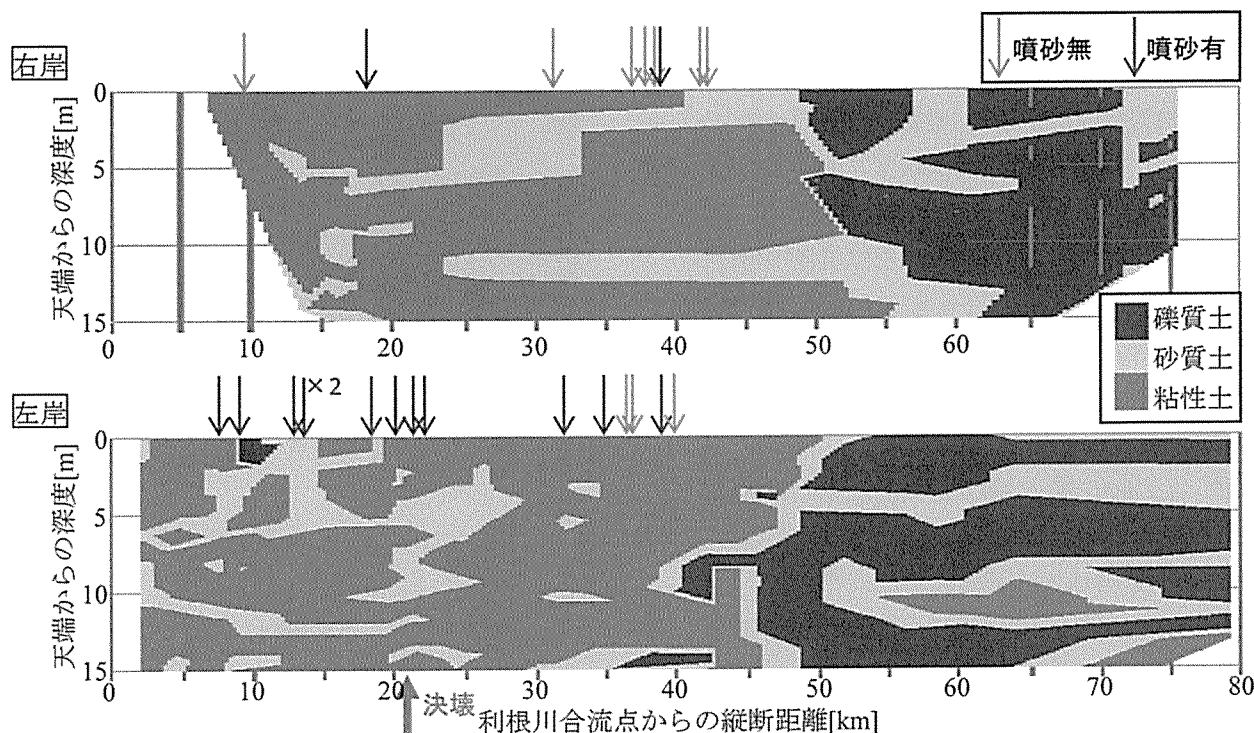


図6 鬼怒川における堤体土質と漏水発生位置の比較

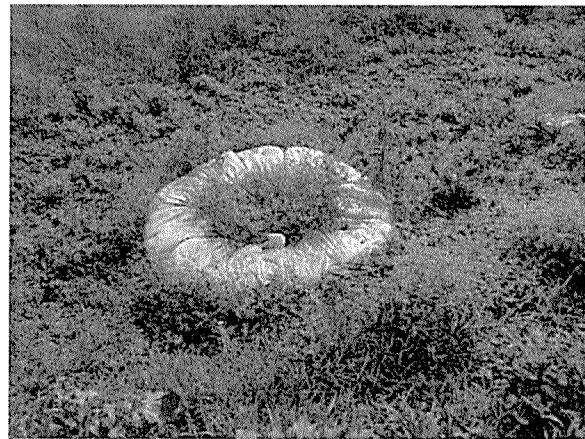
り上流では堤間幅で700m前後となっており、45k付近で300m程度に減少し、その下流の40kまで再び堤間幅は700m程度に広がるが、40kより下流では300m程度となっている。前述した堤防被災箇所は、河床勾配変化点(45k)よりも下流側の緩勾配区間に集中している。特に漏水地点は、川幅が狭くなる40kよりも下流側に集中的に分布していることが分かる。

3. 漏水状況

堤防被害の中で決壊には至らなかったものの被災件数が多かった漏水状況を取りまとめる。まず、漏水が堤体土質やその浸透能と直接的に関係することに着目して、堤体土質の縦断分布と漏水発生位置を図6に示す。この堤体土質データは、国総研が公開している「堤体土質の土質試験結果情報¹⁰⁾」に基づいて作成している。このデータは、堤防の表のり面・天端・裏のり面におけるボーリング調査結果を記載しており、ここでは、天端データにおける粘土・シルト・砂・礫分の割合から土質を粘性土・砂質土・礫質土に分けて表示している。なお、天端ボーリングデータの縦断方向の空間解像度は十分でない地点があるため、ここではあくまでも傾向を見るために用いることに留意されたい。また、漏水発生地点は、噴砂が見られたところと(噴砂有)、そうでないところ(噴砂無)を色分けして表示している。これより、漏水が集中的に発生した45kより下流域では、粘性土と砂質土で構成されている。それに対して45kよりも上流域では、礫質土と砂質土から構成され、特に、礫質土の割合が高いことが分かる。堤体高さが4～5m程度であることを考慮すると、堤体部分とその下の基礎地盤の部分(5～15m)では土質に大きな差異は無い。これらの結果と2章を合わせると、堤防被災エリアの特徴は川幅が狭く緩勾配の河道で、かつ、粘性土・砂質土で構成される堤防からなっているといえる。また、45kより上流域と下流域では、堤防の冠水時間も大きく異なっている(石井地点(75k):約11時間、平方地点(37k):20時間)。このような洪水の冠水時間と堤体の浸透能の違いが漏水発生の有無と関係していると考えられる。より詳細な検討には堤体内の浸透流解析を行う必要があるが、既にそのような取り組みが行われている¹¹⁾。



(a) 月の輪



(b) 釜段

図7 漏水対策 (20.15k 左岸)

漏水時には対策として、図7に示すように、漏水地点周囲に月の輪や釜段が作られる。一般に漏水量や漏水地点数を正確に把握することは困難であるが、月の輪や釜段の数から、最低限の情報（地点数や水量の大小）は把握できる。そこで、月の輪などが設置された漏水地点に出向き、現地観測を行った。観測日は発災から2～3ヶ月経過した2015年11、12月とし、月の輪や釜段の数やサイズ、位置を測ると共に、堤防断面形状や堤防表のり面・裏のり面の痕跡水位を計測した。ここでの測量には、VRS方式RTK-GNSS (Trimble社 R4 および R6, TOPCON社 HiPerV GGDMD型) を用いた。また、痕跡水位計測では、発災から時間が経過しているため必ずしも痕跡が明確でない地点が多かったため、表のり面における未計測地点では、別途行った河道痕跡調査結果を内挿した結果を用いる。得られた結果を図8のように、堤防断面形状上に、表のり面の痕跡水位や月の輪（もしくは釜段）の位置をプロットする。地点によっては、裏のり面の痕跡水位も図示する。

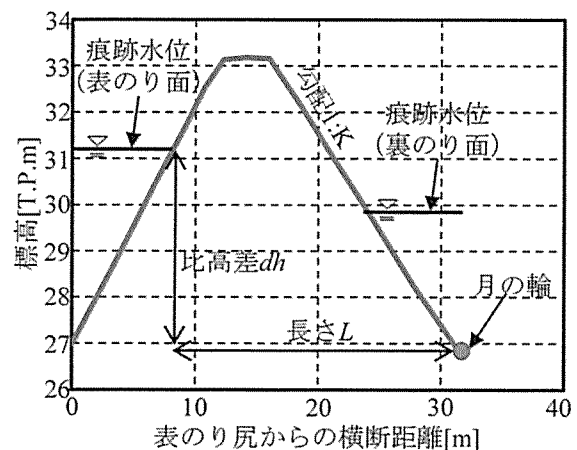


図8 堤体断面形と痕跡水位、月の輪の位置 (41.9k 右岸)

これらの結果を取りまとめて得られた各漏水地点の概況を表3に示す。ここでは、噴砂の有無、のり崩れの有無（規模としては、1m以下の範囲では「小」、それ以上では「大」）、月の輪と釜段の数の和、樋管等の情報を表示する。また、表のり面の痕跡水位と月の輪との比高差 dh 、平均動水勾配 $i (=dh/L)$ 、裏のり面の勾配 K も示す。漏水箇所は23地点であるが、表中では38.15kと38.17kを分けており、計24箇所の結果を示す。まず、全地点中樋管・揚水機場の影響を受けているケースは6地点で見られ、そのうち、3地点 (No.12, 18, 19a) はこれら施設直上での漏水が発生していた (図9)。残りの3地点 (No.19b, 22, 23) では、施設から離れた地点に月の輪や釜段が位置しており、その周囲の裏のり面では明確な洪水痕跡がいずれも確認されている (図10)。この痕跡は、洪水中に樋管が閉められたため内水氾濫が生じたときのものと考えられる。鬼怒川本川の水位低下後に樋管が開けられると、冠水していた裏のり面側では水位が急激に低下するため、堤体中の残留間隙水圧の影響で漏水が発生したものと推測される。詳細なメカニズムの把握には、室内実験等による検討が必要である。

残りの18地点の特徴を抽出するために、比高差 dh 、平均動水勾配 i 、裏のり面勾配 K の頻度分布をまとめたものを図11に示す。これより、比高差は比較的2～4mに集中しており、最大値は4.8m、平均値は2.9mで

表3 各漏水地点の概況

No.	左右岸	距離 [km]	噴砂 有無	のり 崩れ	月の輪と 釜段の数	樋管等	比高 差 [m]	動水 勾配	勾配 [割]
1	左岸	7.9	○	—	1	—	2.12	0.13	3.0
2	左岸	9.1	○	—	6	—	2.64	0.18	2.5
3	右岸	9.3	×	—	7	—	1.39	0.17	1.8
4	左岸	13.2	○	—	8	—	3.19	0.26	2.4
5	左岸	13.35	○	大	2	—	1.78	0.17	2.3
6	左岸	13.6	○	大	2	—	1.89	0.19	2.0
7	右岸	18.0	○	大	2	—	3.24	0.24	2.5
8	左岸	18.5	○	大	3	—	2.59	0.20	3.3
9	左岸	20.15	○	小	11	—	3.83	0.32	2.8
10	左岸	21.5	○	—	1	—	4.22	0.17	3.5
11	左岸	22.3	○	—	1	—	4.75	0.20	3.1
12	右岸	31.0	×	—	1	今宮 排水樋管	0.73	0.06	2.7
13	左岸	32.1	○	—	1	—	4.60	0.23	2.2
14	左岸	35.1	○	—	2	—	2.66	0.11	2.6
15	左岸	36.5	×	—	1	—	0.63	0.05	3.1
16	右岸	36.8	×	—	1	—	2.83	0.16	3.0
17	左岸	36.8	×	—	1	平方 排水樋管	1.94	0.14	2.2
18	右岸	37.5	×	—	1	高崎 揚水機場	1.57	0.16	4.7
19a	右岸	38.15	×	—	1	大渡戸 排水樋管	3.35	0.13	3.8
19b	右岸	38.17	○	—	12	大渡戸 排水樋管	5.32	0.17	3.8
20	左岸	39.1	○	小	1	—	3.84	0.18	2.0
21	左岸	40.0	×	—	8	—	3.78	0.23	1.8
22	右岸	41.5	×	大	0	上山川 排水樋管	3.22	0.15	2.4
23	右岸	41.9	×	—	8	結城 排水樋管	4.36	0.19	2.5



図9 揚水機場近傍の月の輪 (37.5k 右岸)



図10 裏のり面の冠水状況 (38.17k 右岸)

あった。動水勾配は0.15～0.20に44%と集中しており、平均値は0.18であった。ただし、最小値は0.046であること、0.25を越えるケースも12% (2地点) 存在しており、幅広く分布しているといえる。裏のり面勾配は1.5割～3.5割まで幅広く存在しており、緩勾配よりも急勾配のほうが多いという傾向は見られなかった。

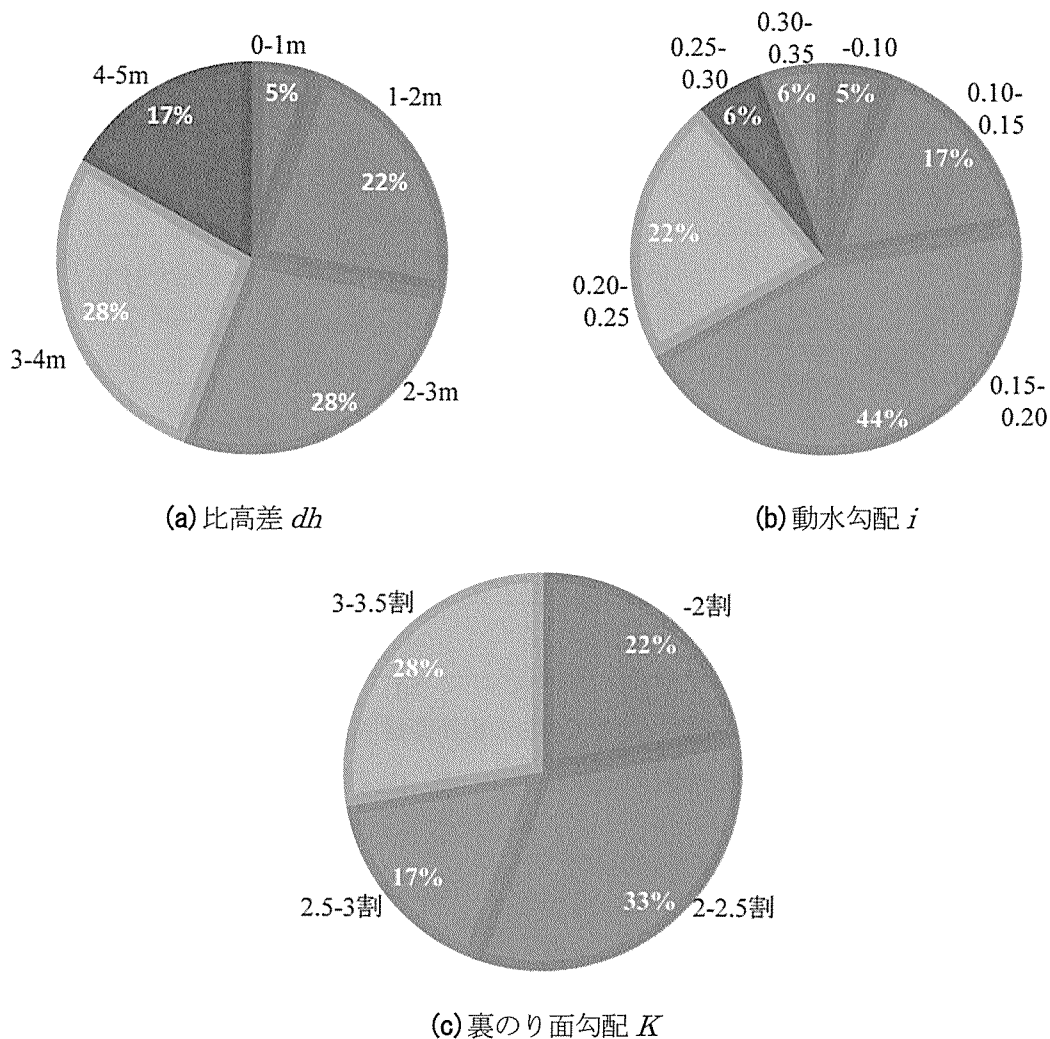


図 1.1 漏水地点の水理量・堤体条件

4. 決壊・溢水状況

4.1 洪水時の水位の特徴

鬼怒川では、2章に記載したように、決壊が1地点、溢水が7地点で発生した。その詳細を検討する前に、鬼怒川における越水・溢水状況の全体像を把握するために、河道痕跡水位調査を行った。現地観測は、発災直後の平成27年10月6日、10月15日、11月4日に行われた。痕跡調査では、左右岸において一定の距離間隔（1km間隔等）で行うのは一般的であるが、期間と人数の制約のため、ここでは、決壊と大きな溢水が生じた25k付近の左岸側をいずれもカバーするよう、左岸では0k～46k、右岸では17k～27kおよび40.5k～41.9kの区間で概ね1km間隔で実施した。また、21k左岸の決壊地点や25kの溢水地点では、上記よりも細かい間隔で痕跡水位観測を行った。痕跡水位計測には、VRS方式RTK-GNSS (Trimble社 R4 および R6) を用いた。河道内の洪水痕跡としては、痕跡が不明確となる堤防表のり面よりも、河道内の樹木、堤防に設けられた道路などに泥が付着して出来た洪水痕跡を可能な限り計測対象とし、やむを得ない場合には樹木に引っかかる草やゴミも計測対象とした。また、計測後に全体の痕跡水位の縦断形状を再度検討し、不自然な痕跡水位（周囲と比べて異常に高いもしくは低い）は再度計測するか、データ解析の対象から除外した。

図 1.2 は、両岸における痕跡水位と堤防天端高（左岸のみ）の縦断変化を示す。図中には、鬼怒川における計画高水位（H.W.L.）と過去の洪水痕跡（H11年台風5号、H14年台風6号）も表示している⁹⁾。また、決

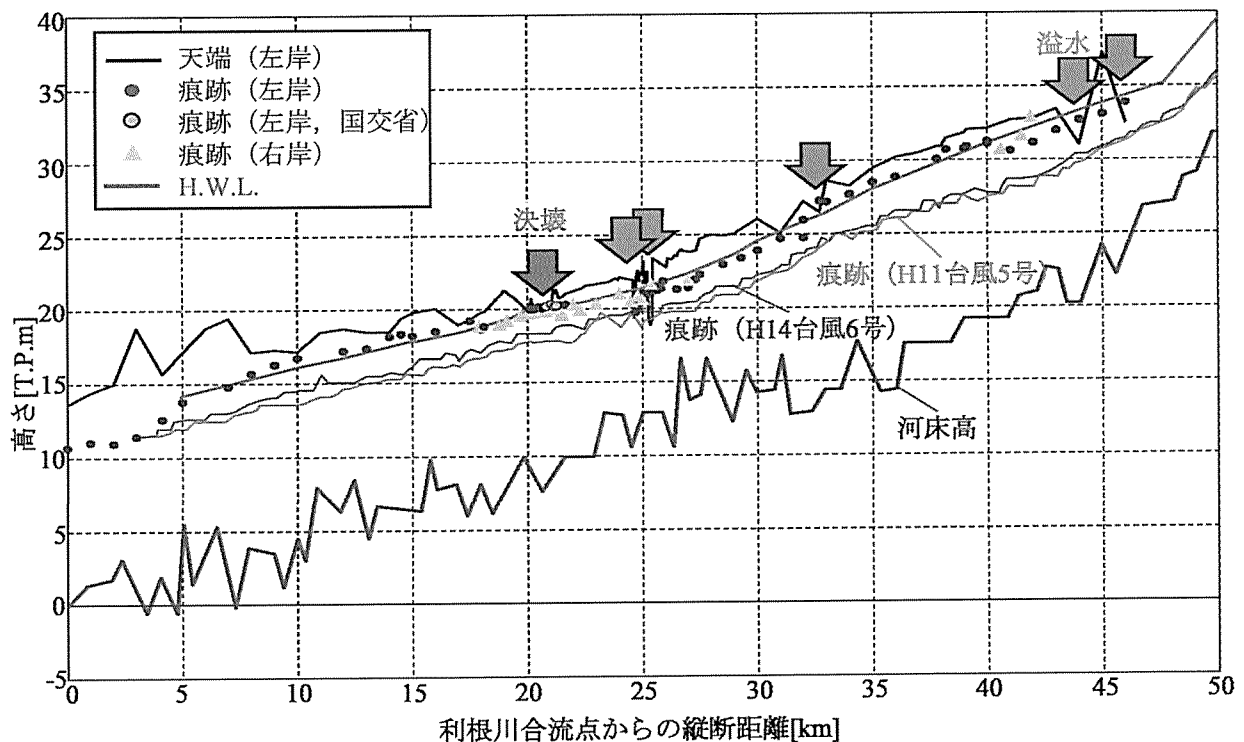


図12 鬼怒川における痕跡水位の縦断分布（一部、国交省のデータ^{9), 12)}も使用)

壊地点付近において国交省が計測した痕跡水位観測結果¹²⁾を図示している。決壊地点と溢水地点（5か所、左岸のみ）も合わせて表示する。これより、今次災害における痕跡水位は、8k～18k、20～21k、32k～40kにて計画高水位を上回り、広範囲にわたり超過洪水が発生していた。また、今次災害の痕跡水位は過去の洪水（H11年、14年）の水位よりも3、4mも高い。

次に、鬼怒川水位観測所において得られた水位の時系列データを図13に示す。ここでは、堤防被災が生じた区間の下流域4地点（下流から水海道（10.9k）、鎌庭（27.3k）、平方（37.2k）、川島（45.7k））と中上流域2地点（石井（75.1k）と佐貫（106.8k））の結果を示す。また、各地点の計画高水位も合わせて図示する。これより、水位ピーク時刻は、佐貫では9月10日4:40、石井では同日6:20、川島では9:20、平方では10:30、鎌庭では11:40、水海道では13:10にそれぞれ現れた。洪水開始前（基準として9月6日0時）からの水位上昇量は、佐貫では5.8m、石井では4.5m、川島では9.3m、平方では12.8m、鎌庭では6.6m、水海道では11.9mとなり、中流域よりも下流域の方において水位上昇量が顕著である。ピーク水位と計画高水位を比べると、中流域の石井地点ではピーク水位は計画高水位よりも1m以上低かったが、下流域ではピーク水位が計画高水

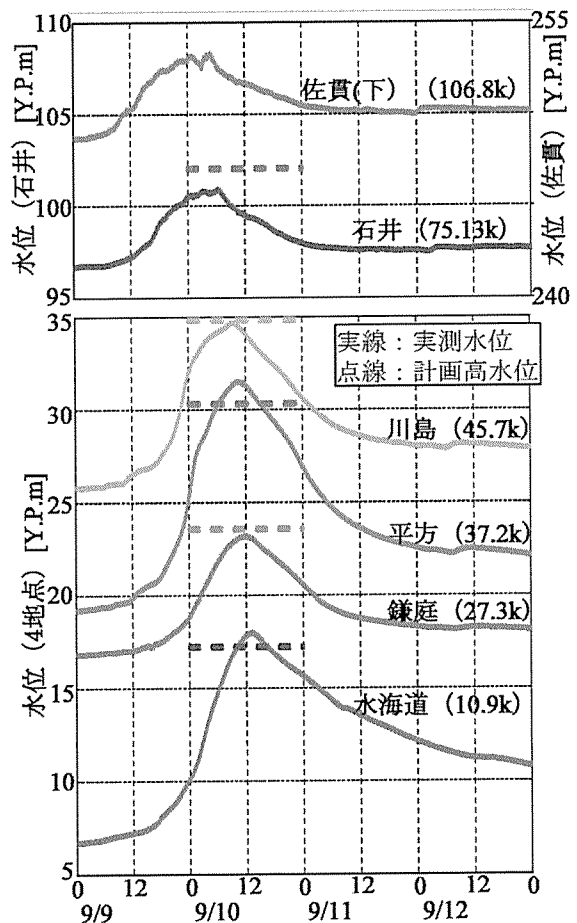


図13 洪水中の水位時間変化（実線：水位，点線：計画高水位（佐貫以外を表示））

位と同程度が2地点（川島，鎌庭）と上回ったのが2地点（平方，水海道）であった。10分毎に記録されている水位データを用いると，平方では，ピーク水位は計画高水位よりも1.19m高く，計画高水位より高い水位の継続時間は約9時間となった。同様に，水海道では，ピーク水位は計画高水位よりも0.75m高く，計画高水位より高い水位の継続時間は約6時間10分となった。痕跡水位や水位時系列データより，約20kmに及ぶ長い区間のピーク水位が計画高水位を上回ったこと，かつ，水位観測所では長くて9時間の超過洪水が発生していたことが明らかとなった。



図1-4 決壊時の斜め航空写真（9月10日 15:07 撮影，国交省関東地方整備局提供¹³⁾）

4.2 決壊状況

鬼怒川21k左岸地点（常総市三坂町地先）における決壊状況を記述する。決壊当日におけるデータは非常に限定的であるため，ここでは，国交省関東地方整備局・鬼怒川堤防調査委員会資料¹²⁾に基づいて説明する。

図1-4は決壊時における斜め航空写真¹³⁾を示す。これは9月10日15時07分に撮影されたものであり，当日，決壊が12時50分ごろに発生したとのことから¹²⁾，この写真は決壊後2時間強経過後の写真である。このように，決壊地点から堤内地側に氾濫流が流れ込んでいる様子が分かる。また，氾濫流は概ね堤防を垂直に横切る流向となっている。次に，堤防上より撮影された堤防決壊前後の写真を図1-5に示す。このように，当日



図1-5 決壊前後の様子（国交省関東地方整備局¹²⁾）

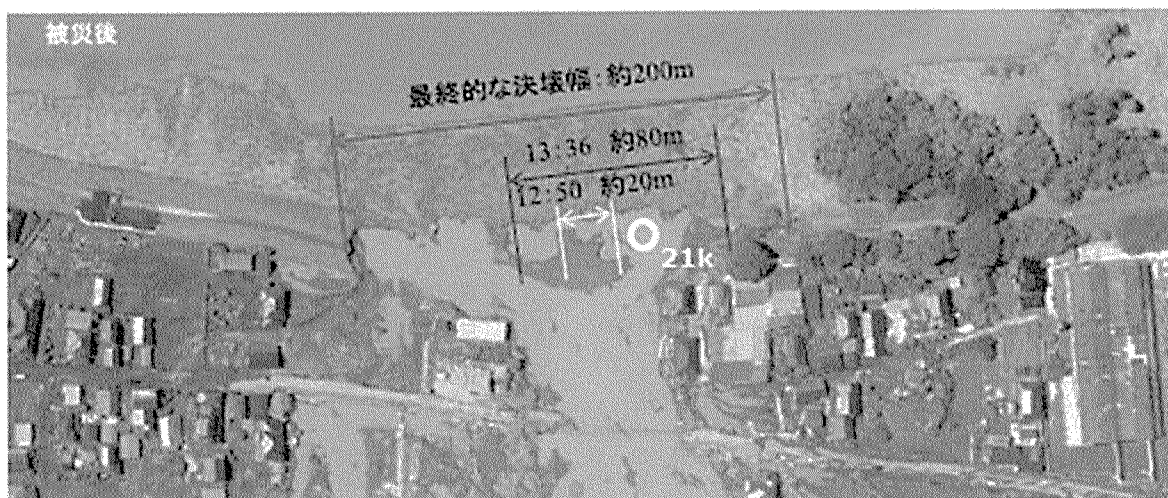


図 16 破堤幅の時間変化 (国交省関東地方整備局 14)

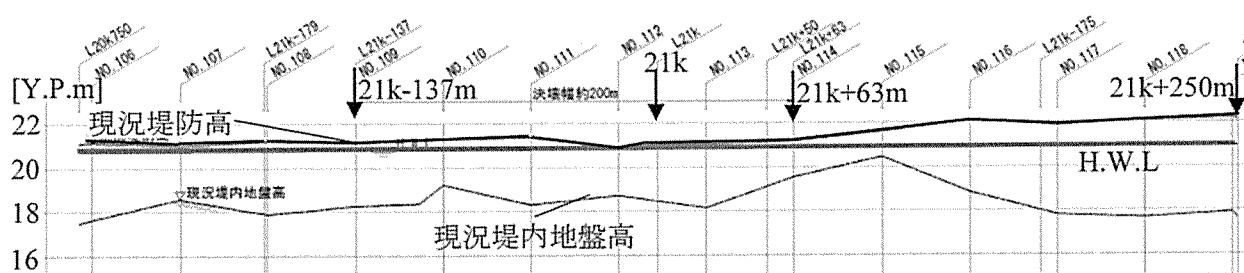


図 17 決壊地点近傍における痕跡水位分布 (国交省のデータ 12)

11:11には既に越水が生じており、天端から裏のり面を流れ下る様子が伺える。それから約50分後の12:00の時点では、越水の範囲が縦断方向に広がると共に、表のり面側の植生の水没範囲も広がっており、水位が上昇していることが分かる。また、図中の黒矢印のように、二股に分かれた形で越水が生じていた。ほぼ同時刻の12:04では、越水が生じていたところの一部で、裏のり尻部で窪んでいる部分が見られ、そこに越流水が周囲から集まっている様子が伺える。これは、裏のり尻部付近において侵食が発生・進行中であるものと考えられる。そこから約45分後の12:50ごろに決壊した。その後の13:27では、堤防の決壊幅が広がり、かつ、水位が低下したことが分かる。また、写真手前側を見ると、表のり面側の堤体土や天端を舗装しているアスファルト部分は残っているものの、裏のり面側の堤体土が大きく侵食されている様子が伺える。

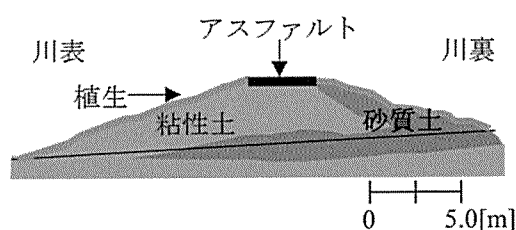


図 18 鬼怒川決壊地点の断面形と堤体材料 (下流側断面 14)

堤防決壊の拡幅状況としては、図 16 に示すように、破堤開始当初 (12:50) は約20mであったが、その後の13:36時点では約80mに広がった。その際には、破堤幅は下流側よりも上流側への広がり幅が大きい。これは、決壊開始箇所は、図 15 の12:00時点の奥側の矢印であり、その上流側 (図では手前側) も既に越水により裏のり面侵食が生じていたことが関係している。また、同図で示したように、横越流よりも正面越流が卓越したことも影響している。堤防はその後も破堤幅は拡大し、最終的な破堤幅は200mに達した。

堤防決壊の拡幅状況としては、図 16 に示すように、破堤開始当初 (12:50) は約20mであったが、その後の13:36時点では約80mに広がった。その際には、破堤幅は下流側よりも上流側への広がり幅が大きい。これは、決壊開始箇所は、図 15 の12:00時点の奥側の矢印であり、その上流側 (図では手前側) も既に越水により裏のり面侵食が生じていたことが関係している。また、同図で示したように、横越流よりも正面越流が卓越したことも影響している。堤防はその後も破堤幅は拡大し、最終的な破堤幅は200mに達した。

決壊地点における越水状況を把握するために、図 12 に示す痕跡水位データより、決壊地点近傍のデータをクローズアップしたものを図 17 に示す。このように、決壊地点やその近傍の堤防天端高は計画高水位に

近いところがあり、そこでは痕跡水位が堤防高を上回っている。そのため、決壊地点やその周辺では越水しており、この時の越流水深は約20cm程度であった。また、決壊が始まったのが12:50ごろであり、当日の11:11には越水が確認されていることから、決壊までの越水時間は約2時間程度であったものと推測される。鬼怒川決壊地点における堤体材料としては、図18に示すように、裏のり側が砂質土で覆われており、前述したように、この裏のり側から侵食が始まった¹⁴⁾。

4.3 室内実験による決壊メカニズムの検証

前述のように、21kの決壊地点では越流水深約20cm、越流時間約2時間の越水が生じて、決壊に至った。鬼怒川堤防調査委員会では、詳細な検討を行った結果、決壊の主要因として越水を挙げている¹⁵⁾。越水によりどの程度堤防が侵食され、決壊に至るかを確認するために、大型開水路を用いた堤防模型の越水実験を行った。上述した鬼怒川での決壊条件を念頭にして堤体・水理条件を設定し、これら堤体・水理条件と越水決壊状況の関係を検討した。越流水深や堤体材料の影響なども検討を行っているが、ここでは天端のアスファルト舗装の有無が堤防決壊に及ぼす影響に関する検討結果のみ示す。

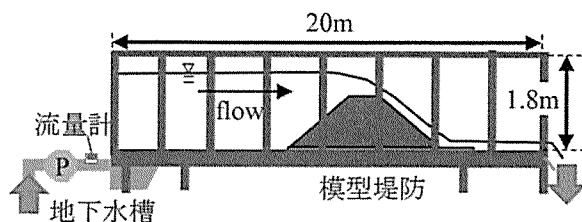


図19 本実験で用いる大型開水路

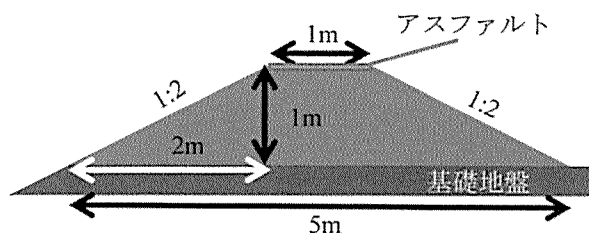


図20 堤防模型の寸法

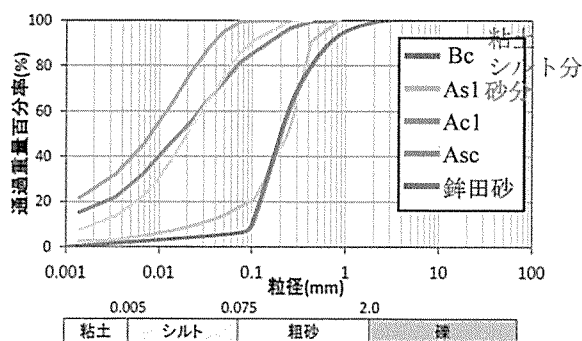


図21 現地決壊地点と室内模型実験の堤体材料の粒度分布（国交省資料¹⁴⁾に加筆）

(1) 実験方法

本実験では、東京理科大学所有の大型水平開水路を用いた。大型開水路は、図19に示すように、長さ20m、高さ1.8m、幅1.0mであり、この水路内に基礎地盤0.30mの上に堤体高さ1.0m、天端幅1.0m、表・裏のり面を2割勾配とした模型堤防を設置した（鬼怒川堤防の1/4スケール、図20）。堤防の侵食状況や越水状況を把握するために、複数台のデジタルビデオカメラを側面・上面等に設置した。

土堤の基礎的な越水侵食状況を把握することや天端舗装の効果を見るために、堤体を砂質土で作り、天端にアスファルト舗装無（Case1）と有（Case2、厚さ4cm）の2ケースを設定した。現地の水理状況とフルードの相似則に基づいて、Case1では越流水深 $h=2\text{cm}$ 、Case2では $t=10, 20, 30$ 分（ t : 越流開始からの時間）まで $h=2, 3, 4\text{cm}$ とすると段階的に増やした。堤体材料の砂質土としては、現地堤防の砂質土における粒度分布に近い鉾田砂（ $D_{50}=0.22\text{mm}$ 、 $F_c=6.1\%$ ）を採用した（図21）。締固め度は砂質土では $D_c=90\%$ とした。

(2) 実験結果

堤防天端のアスファルト舗装が越水決壊状況に及ぼす影響を把握するために、天端舗装無（Case1）と有（Case2）における越流侵食形状の時間変化を図22に示す。まず、舗装無（Case1）では越流開始直後から侵食が始まり、 $t=1.5\text{min}$ で裏のり面及び天端の一部が侵食された。この際、裏のり面ではガリ侵食が発

生し (図 2 3 (a)), ガリの深さが増えつつその周囲が崩れてガリ幅が拡大する, というプロセスを経て裏のり面の侵食が進んだ. $t=2.5\text{min}$ で侵食が表のり肩に到達し, 決壊 (天端が崩落し, 堤体高さが減少した時点を決壊と定義) した.

一方, 舗装有 (Case2) では, $t=10\text{min}$ まで天端は侵食されずに裏のり面のみが侵食された. この時, 裏のり面ではガリ侵食は顕著でない (図 2 3 (b)). その後, 裏のり面が垂直に切り立った形でひさし状に侵食され, $t=15\text{min}$ 以降天端が裏のり面側から徐々に侵食され, $t=25\text{min}$ に決壊した. なお, Case 1 で見られた裏のり面のガリ侵食発生条件を調べるために, 別途小型模型実験を行ったところ, 越流水深が小さいとガリは形成されるが, 大きな越流水深ではガリは発生しないことが確認された (図面省略).

この堤体侵食状況を定量的に調べるために, 堤防の高さ残存率 (=ある時間における堤体高さを初期高さ (断面積) で除したものを) 図 2 4 に示す. Case1 では堤体高さが素早く減少したが, Case2 で天端侵食が表のり肩に到達する $t=25\text{min}$ まで堤体高さを維持できた. このように, 天端のアスファルト舗装は耐越水対策に有効であることが示された. ただし, 決壊開始後における高さ残存率が減少する様子は, Case1, 2 で大きな差はなく, 越水に対してより粘り強い堤防構造にするには, 更なる工夫が必要となる.

以上のように, 天端舗装の有無に関わらず越水のみで堤防決壊が発生した. また, 天端舗装の効果により, 決壊にかかる時間が本実験ケースでは 10 倍に延びた. この Case2 の決壊時間をフルードの相似則により鬼怒川スケールに換算すると, 決壊時間は 50 分となり, 実際の約半分であった. 本実験と実際の決壊現場における決壊時間の差異には, いくつかの要因が挙げられる. まず, Case1, 2 では堤体表面に何も無い裸堤であるが, 実際には, 堤体表面には植生が生い茂っていた. この植生により, 越流水の裏のり面上での流速が大きく低下し, かつ, 表面土の侵食も抑制される. 次に, 本実験では, 堤体材料として砂質土である銚田砂のみを用いたが, 実際には,

図 1 8 に示すように砂質土と粘性土で構成されており, この粘性土の影響が挙げられる. 粘性土は締固め度や含水比の条件により, 耐越水侵食性が向上することが予想されるため, 粘性土の影響抽出には注意を要する. また, 決壊地点は越水開始前に長時間洪水流と接していたため, 堤体が湿潤 (飽和) 状態となっていたと考えられるが, 本実験ではこのような状況は考慮せずに非湿潤 (不飽和) 状態のまま越水実験を開始した. 飽和状態の場合には, 不飽和よりも侵食されやすいものと考えられる¹⁶⁾. さらに, 今回は堤体高さ 1m で,

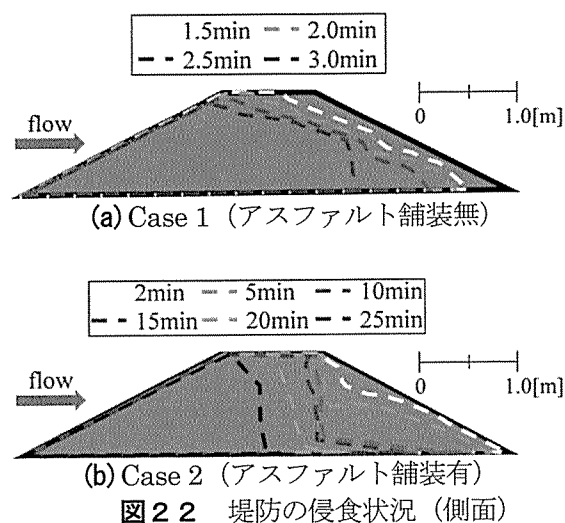


図 2 2 堤防の侵食状況 (側面)

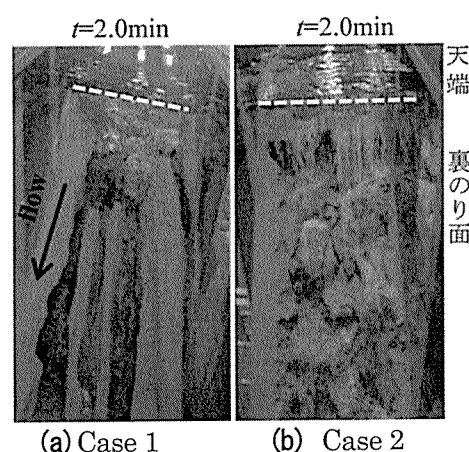


図 2 3 裏のり面の侵食状況

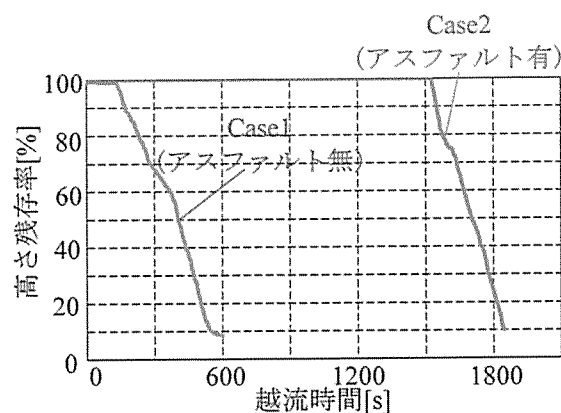


図 2 4 堤防高さ残存率の時間変化

鬼怒川スケールに対して 1/4 スケールの模型実験を行ったが、それでも相似則の問題が含まれ、実験における現地状況の再現性については検討の余地が残る。これらの植生や粘性土の存在は決壊時間を長くする方向に影響するため、本実験と実現場の差異に大きく関与している可能性が高い。

4.4 溢水状況

鬼怒川では計 7 地点で溢水が発生したが、其中最も氾濫被害の大きく、2 地点の溢水が生じた若宮戸地区 (25.35k, 24.75k) について記述する。

図 2 5 は洪水時における若宮戸地区の斜め航空写真である。このように、写真上流側の 25.35k 付近と下流側の 24.75k 付近において溢水が発生し、鬼怒川左岸側において洪水氾濫が広域にわたり発生している。国交省⁶⁾によると、元々、この区間は自然堤防が存在したが、上流側 25.35k 地点では、河川区域外においてソーラーパネル設置のために自然堤防部分の掘削が長さ 200m にわたり行われた (H26 年 3 月頃)。緊急措置として、H26 年 7 月には大型土嚢が設置され、その土嚢高さは掘削前の自然堤防の低い箇所とほぼ同じであった。また、下流側の 24.75k はこのソーラーパネル設置とは関係がないが、部分的に標高の低い箇所が存在している。

図 2 6 は溢水地点付近における痕跡水位と堤防

天端高 (自然堤防区間も含む) の縦断変化を示す。図中には、掘削前の自然堤防の一番低い箇所の高さ (≡土嚢設置高さ) も合わせて表示している。これより、ソーラーパネル設置箇所の 25.35k では痕跡水位は土嚢高さを 50-70cm 上回っている。これより、元々の自然堤防が掘削される前の状態でも溢水が生じていたものと考えられる。ただし、溢水後にどのように自然堤防部分が侵食されるかについては不明である。また、下流側の 24.75k においても痕跡水位が最も低い箇所より高く、こちらでも溢水が生じていることが確認された。

5. まとめ

- 1) 堤防決壊地点では痕跡水深約 20cm の越水が生じ、越水開始から約 2 時間で決壊したと推測された。漏水箇所の約 1/4 は樋管周囲で生じた。河道内の痕跡水位は広範囲にわたり H.W.L を超えていた。
- 2) 模型実験結果より、土堤は越水に対して短時間で侵食されることから、今回の鬼怒川の堤防も越水のみでも決壊に至る可能性が高いことが明らかとなった。
- 3) 天端のアスファルト舗装は一定の耐越水性効果を有しており、本実験では、決壊に至る時間が舗装無と比べて舗装有では 10 倍に延びることが確認された。ただし、より粘り強い構造とするには、今後、越水から決壊までの時間をより長く確保できる堤防構造の開発が必要であると考えられる。



図 2 5 若宮戸地区の溢水状況の斜め航空写真 (9 月 10 日 15:07 撮影, 国交省関東地方整備局提供¹³⁾)

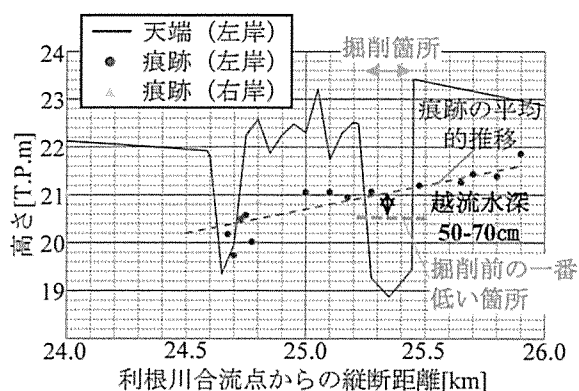


図 2 6 溢水地点周辺における痕跡水位と天端高の縦断分布 (掘削箇所、掘削前の一番低い箇所 (≡土嚢設置高さ) も表示している)

謝辞：本調査に際し、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の皆様には現地調査や室内実験において多大なるご協力を頂いた。特に、大槻順朗助教（現（国研）土木研究所自然共生研究センター）と服部泰士氏（現清水建設株）には現地観測を、倉上由貴氏・守屋博貴氏には室内実験を、それぞれ中心的に実施して頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による被害状況等について（平成 28 年 2 月 19 日版），2016.
- 2) 気象研究所：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の発生要因（平成 27 年 9 月 18 日報道発表資料），
<http://www.mri-jma.go.jp/Topics/H27/270918/press20150918.pdf>.
- 3) 芳村圭：今回鬼怒川洪水をもたらした豪雨の統計解析，平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書，pp.18-20，2016.
- 4) 気象庁：災害時気象報告 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨及び平成 27 年台風第 18 号による大雨等（平成 27 年 12 月 4 日），2015.
- 5) 牛山素行：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による犠牲者の特徴，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.72，No.4，pp.I_1297-I_1302，2016.
- 6) 国土交通省 水管理・国土保全局：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に係る被害及び復旧状況等について（平成 28 年 1 月 29 日），2016.
- 7) 国土交通省：台風第 18 号及び第 17 号による大雨（平成 27 年 9 月関東・東北豪雨）等に係る被害状況等について（第 28 報，平成 27 年 10 月 1 日 15 時時点），2015.
- 8) 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：平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書，pp.1-173，2016.
- 9) 国土交通省関東地方整備局：第二回鬼怒川・小貝川有識者会議資料，2006.
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所：観測データ等の公開，
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/database.html>.
- 11) 田端幸輔，福岡捷二：堤防破壊確率と堤防脆弱性指標に基づいた堤防危険箇所の推定法，第 3 回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集，pp.61-64，2015.
- 12) 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資料，2015.
- 13) 国土交通省関東地方整備局：鬼怒川の堤防決壊のとりまとめ，
<http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000091.html>.
- 14) 国土交通省関東地方整備局：第 2 回鬼怒川堤防調査委員会資料，2015.
- 15) 国土交通省関東地方整備局：第 3 回鬼怒川堤防調査委員会資料，2015.
- 16) 奥田敏昭，中川一，水谷英朗，川池健司，張浩：堤体飽和度に着目した堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究，自然災害科学，Vol.33，No.1，pp.29-41，2014.