

6. 河川施設

6.1 河川管理施設全般の被災状況と調査の概要

東北地方太平洋沖地震によって河川で発生した被災の箇所数は、直轄区間で表-6.1、都道府県管理区間で表-6.2のように整理されている（国土交通省 HP、平成 23 年 6 月 6 日時点）。ここで、被災箇所数は余震等により受けた被害も含んだものである。直轄区間において 2,115 箇所、都道府県管理区間において 1,127 箇所が被災が確認されている。図-6.1 は直轄区間、都道府県管理区間および両者を合わせた区間のそれぞれについて、被害状況の箇所数を円グラフに整理した結果である。直轄区間の主な被災状況としては堤防クラックが、都道府県管理区間の主な被災状況としては堤防クラック、護岸被災、堤防のり崩れが挙げられる。また、堤防沈下および液状化について見ると、都道府県管理に比べ直轄管理区間でそれらの割合が多くなっていることが分かる。一般的に中小河川においては、掘込河道区間の多いこと、堤防高が低いこと、護岸等ののり面の勾配が急なことなどから、上記のような結果となったと類推される。

直轄管理区間の被災箇所 2,115 箇所の中で特に被害の大きかった箇所（東北地方整備局管内 29 箇所、関東地方整備局管内 24 箇所）では緊急復旧工事が実施され、平成 23 年 6 月 3 日現在では、東北地方整備局管内の 8 箇所を除く全ての箇所で工事が完了している。さらに本格復旧については、平成 23 年度出水期までに 1,689 箇所を完成させる予定であり、残る 426 箇所については平成 23 年台風期明けに着手し、平成 24 年度出水期までに完了させる予定としている（河川局 HP、河川管理施設の状況、平成 23 年 6 月 3 日現在）。

国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人土木研究所では、災害復旧等に資する情報を得ることを目的として、表-6.3 のとおり、国土交通本省および東北地方整備局の要請に基づく調査および自主調査を行った。主な調査地点を図-6.2 に示す。図中の●印は地震被害について調査を行った箇所、▲印は津波被害について調査を行った箇所である。また、○印は国総研・土研の調査は行っていないが、地方整備局等の調査資料に基づいて本資料に被災状況を記載した箇所であり、ここで印を付した箇所以外にも多数被災箇所は存在する。

今回の地震による河川施設の被害は、地震動による被害が広域的に生じたことに加え、特に東北地方の河川において、津波によって破堤等の甚大な被害が生じたことが大きな特徴である。そこで、以降、地震動による河川施設の被害の状況を 6.2 節、津波による河川施設の被害の状況を 6.3 節に示す。

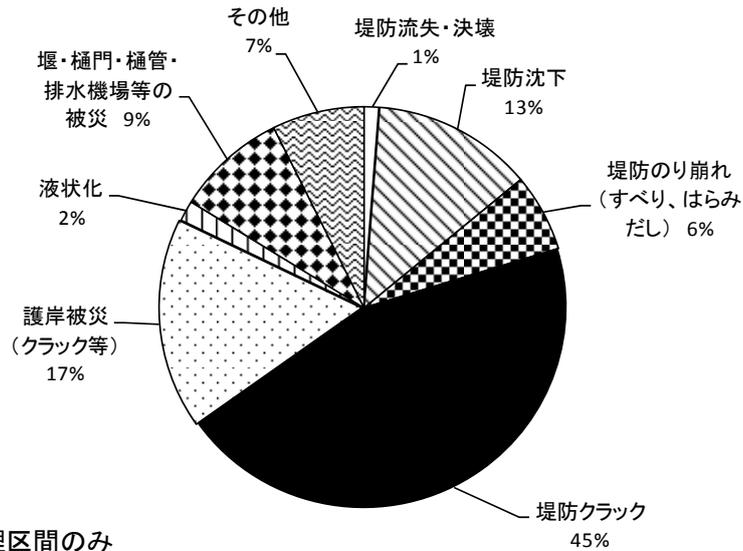
表-6.1 東北地方太平洋沖地震による直轄管理区間の被災状況と箇所数

地整名	水系名	被災状況								水系計
		堤防流失・決壊	堤防沈下	堤防のり崩れ(すべり、はらみだし)	堤防クラック	護岸被災(クラック等)	液状化	堰・樋門・樋管・廃水機場等の被災	その他	
東北	馬淵川	0	0	1	1	5	0	1	5	13
東北	阿武隈川	2	26	16	77	2	0	11	3	137
東北	名取川	1	2	1	26	2	0	2	1	35
東北	北上川	14	62	46	278	121	0	67	58	646
東北	鳴瀬川	9	27	25	183	56	1	26	37	364
東北地整計		26	117	89	565	186	1	107	104	1195
関東	久慈川	0	30	1	46	23	0	8	2	110
関東	荒川	0	0	0	5	0	12	3	2	22
関東	那珂川	0	17	5	43	45	0	14	5	129
関東	利根川	0	106	37	291	106	22	55	42	659
関東地整計		0	153	43	385	174	34	80	51	920
合計		26	270	132	950	360	35	187	155	2115

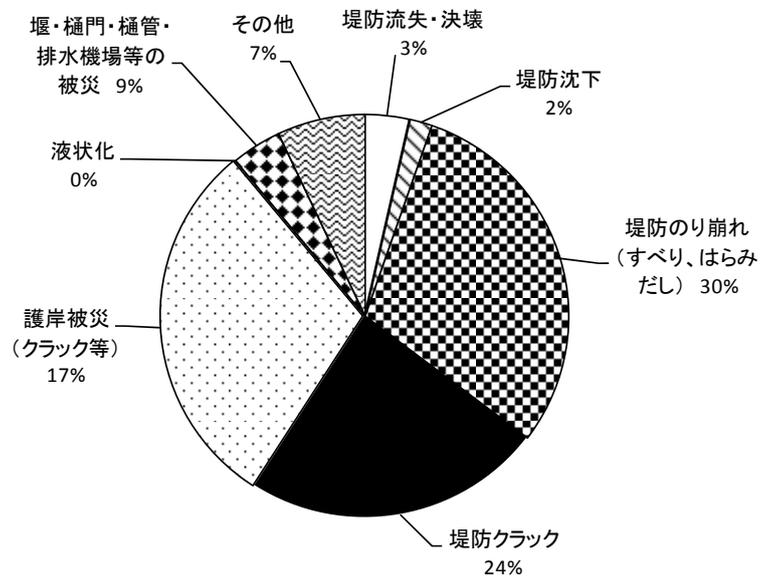
表-6.2 東北地方太平洋沖地震による都道府県管理区間の被災状況と箇所数

都道府県名	被災状況								合計
	堤防流失・決壊	堤防沈下	堤防のり崩れ(すべり、はらみだし)	堤防クラック	護岸被災(クラック等)	液状化	堰・樋門・樋管・廃水機場等の被災	その他	
北海道	0	0	0	0	0	0	0	0	0
青森	1	0	2	0	5	0	0	1	9
岩手	8	1	6	5	87	0	19	19	145
宮城	30	4	232	130	111	0	24	15	546
秋田	0	0	0	0	0	0	0	0	0
山形	0	0	0	1	0	0	0	1	2
福島	1	1	48	16	68	0	2	3	139
茨城	0	4	13	57	20	0	0	12	106
栃木	0	0	3	5	1	0	0	1	10
群馬	0	0	0	0	0	0	0	0	0
埼玉	0	3	4	6	4	0	0	4	21
千葉	0	7	29	47	41	0	0	14	138
東京	0	0	0	0	0	0	0	0	0
神奈川	0	0	0	0	0	0	0	0	0
山梨	0	0	0	0	0	0	0	0	0
長野	0	0	0	0	0	0	0	3	3
新潟	0	0	0	1	0	0	0	5	6
静岡	0	0	1	0	0	0	0	1	2
富山	0	0	0	0	0	0	0	0	0
石川	0	0	0	0	0	0	0	0	0
都道府県計	40	20	338	268	337	0	45	79	1127

(a) 直轄区間のみ



(b) 都道府県管理区間のみ



(c) 直轄区間+都道府県管理区間

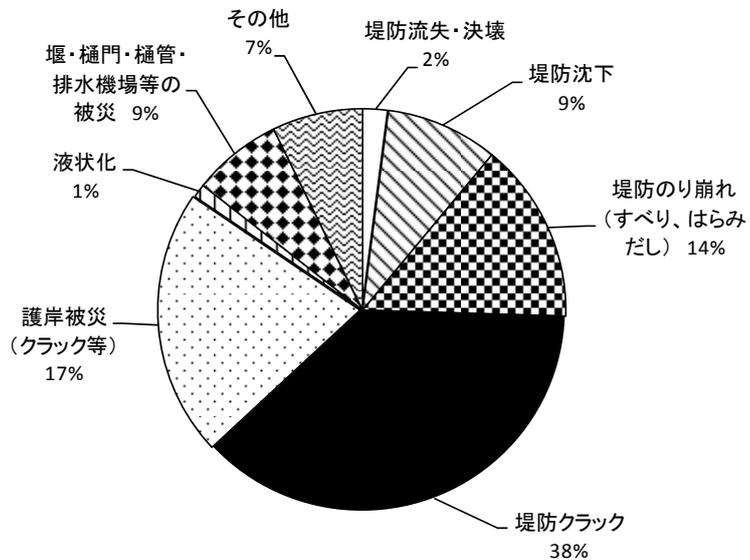


図-6.1 河川における被災状況の割合

表-6.3(1) 調査の日程、区間、調査者

日程	調査区間	調査者
平成 23 年 3 月 12 日 ～13 日	江合川 14.2～30.2km 鳴瀬川 0.6～30.0km 吉田川 1.0～15.4km	河川研究室 服部 敦 河川研究室 福原 直樹
平成 23 年 3 月 16 日 ～18 日	阿武隈川下流 22.4～33.2km 名取川 0.0～0.6km 鳴瀬川 0.0～30.5km 吉田川 14.6～15.5km 北上川下流 3.7～15.2km 旧北上川 19.2～20.1km 江合川 13.4～27.7km 新江合川 2.7～3.0km	土質・振動 佐々木哲也 土質・振動 谷本 俊輔 土質・振動 中島 進
平成 23 年 3 月 18 日	利根川下流 67.2～71.0km 小貝川 31.8～42.1km 江戸川 57.5～58.3km	地質 日外 勝仁 地質 林 浩幸 土質・振動 森 啓年 土質・振動 齋藤由紀子 土質・振動 山木 正彦 土質・振動 中田 芳貴 土質・振動 増山 博之
平成 23 年 3 月 19 日 ～20 日	北上川下流 0.0～8.0km 旧北上川 5.0～6.0km 鳴瀬川 0.0～2.0km 名取川 0.0～2.6km 阿武隈川下流 0.0～3.2km	河川研究部 藤田 光一 河川研究室 服部 敦 河川研究室 武内 慶了
平成 23 年 4 月 6 日	利根川下流 18.6～18.9km 常陸川 1.0～1.5km 横利根川 2.6～2.8km	地質 品川 俊介 地質 日外 勝仁 土質・振動 加藤 俊二 土質・振動 齋藤由紀子 土質・振動 稲垣由紀子 土質・振動 増山 博之 土質・振動 塚本 将康 施工技術 藤田 智弘
平成 23 年 4 月 13 日 ～15 日	北上川下流 3.8～4.7km 旧北上川 1.0～2.0km 鳴瀬川 0.0～1.0km 名取川 0.0～0.6km	CAESAR 田村 敬一 土質・振動 佐々木哲也

表-6.3(2) 調査の日程、区間、調査者

日程	調査区間	調査者
平成 23 年 4 月 13 日 ～15 日	阿武隈川下流 0.0～33.2km 名取川 0.0～0.6km 鳴瀬川 0.0～30.5km 江合川 27.4～27.8km	土質・振動 石原 雅規 土質・振動 谷本 俊輔 土質・振動 増山 博之
平成 23 年 6 月 14 日 ～15 日	阿武隈川下流 0.0～33.2km 名取川 0.0～0.6km 北上川下流 0.0～36.3km 江合川 0.0～27.4km	土質・振動 石原 雅規 土質・振動 齋藤由紀子 土質・振動 増山 博之



図-6.2(a) 北上川、旧北上川、江合川、鳴瀬川、吉田川における調査地点



図-6.2 (b) 阿武隈川、名取川における調査地点

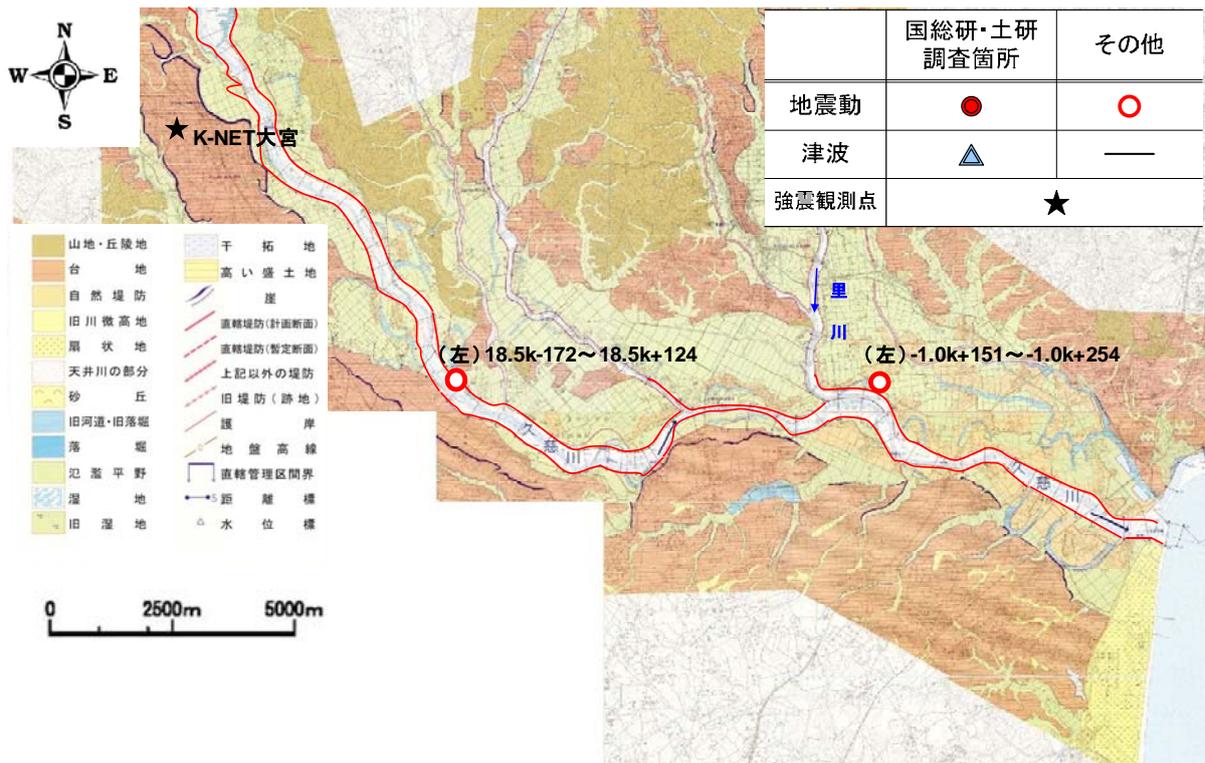


図-6.2 (c) 久慈川、里川における調査地点

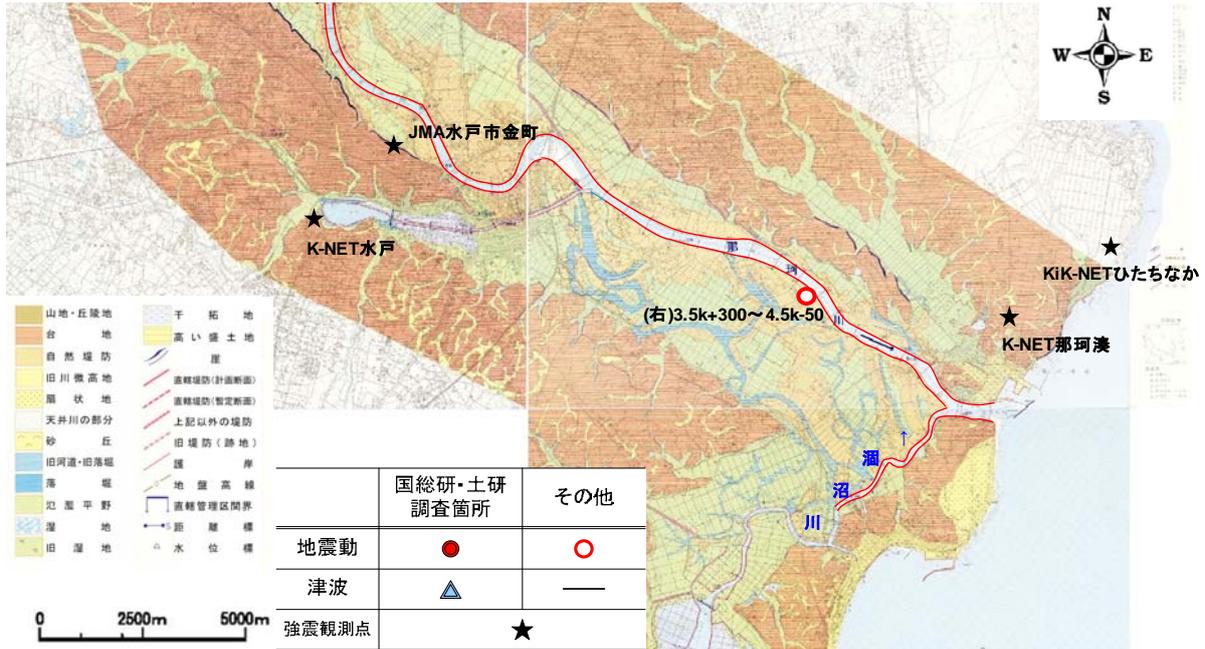


図-6.2(d) 那珂川、湊沼川における調査地点

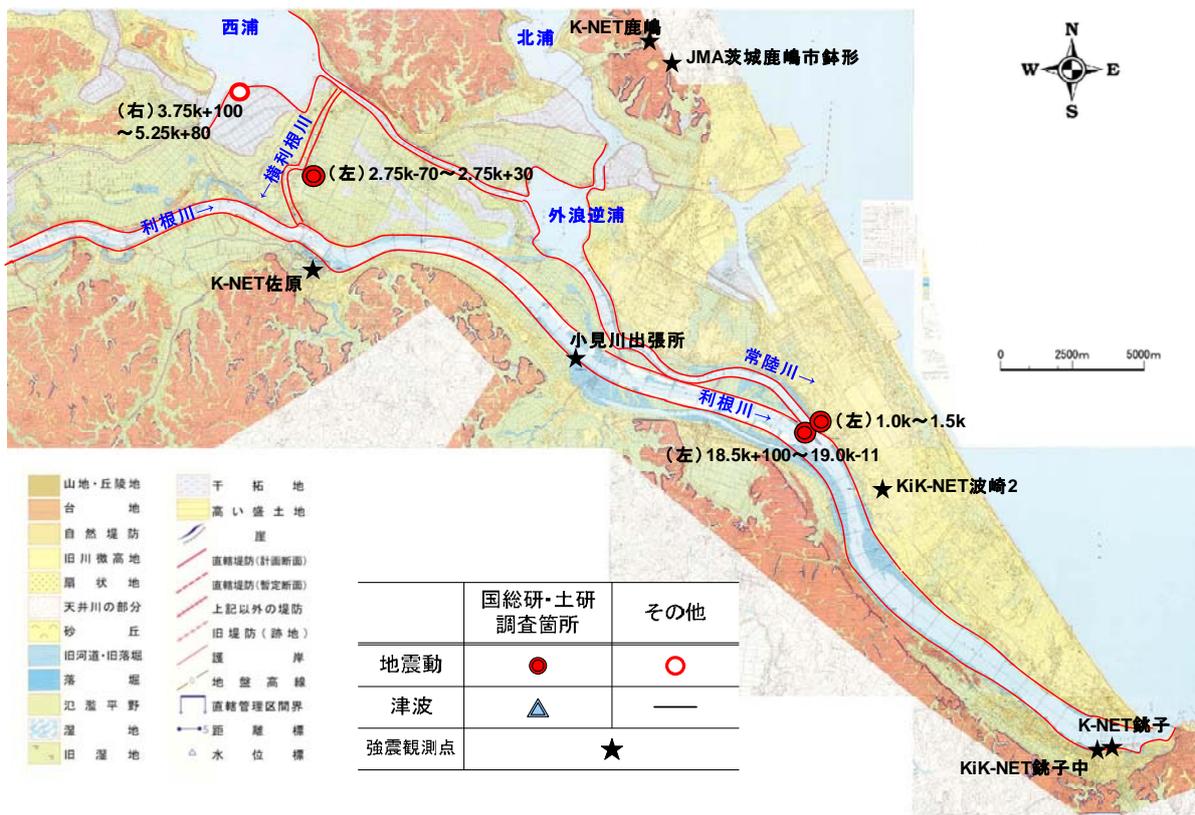


図-6.2(e) 利根川下流、霞ヶ浦における調査地点

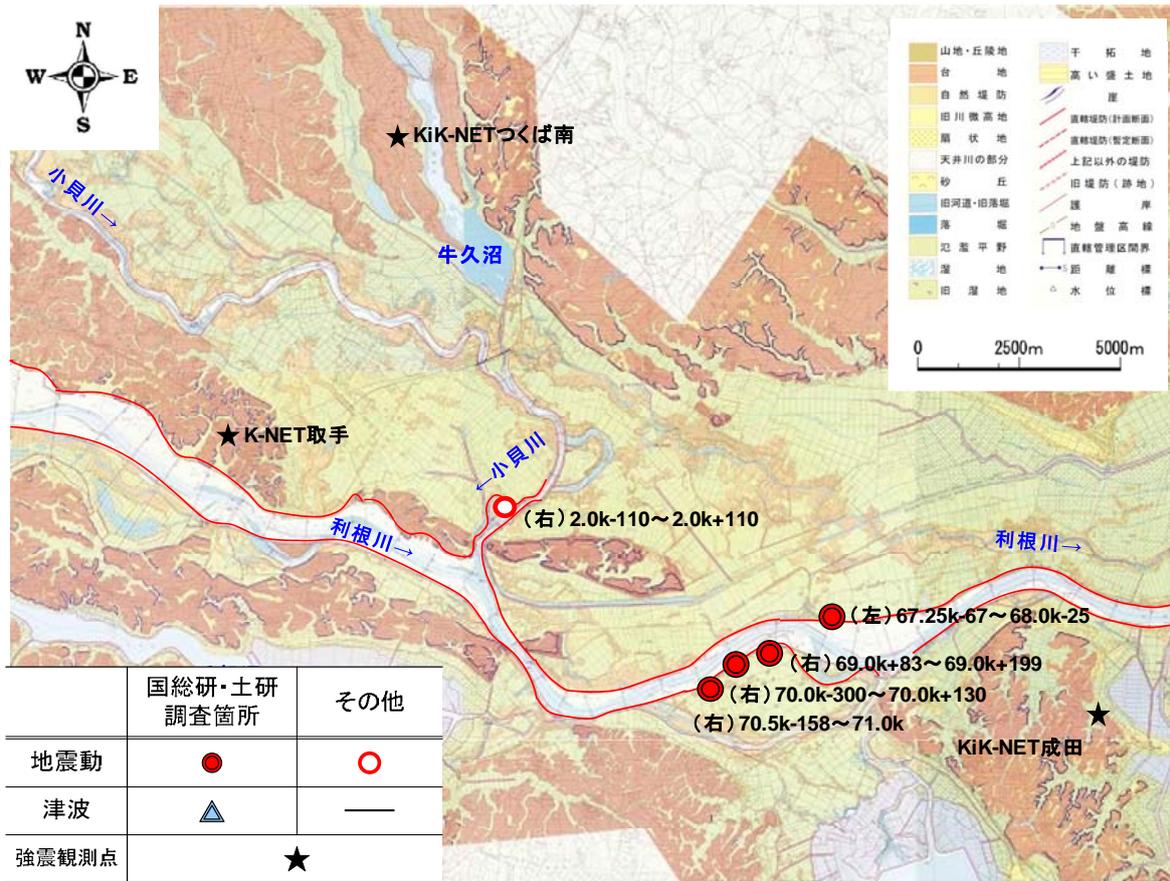


図-6.2(f) 利根川下流、小貝川における調査地点

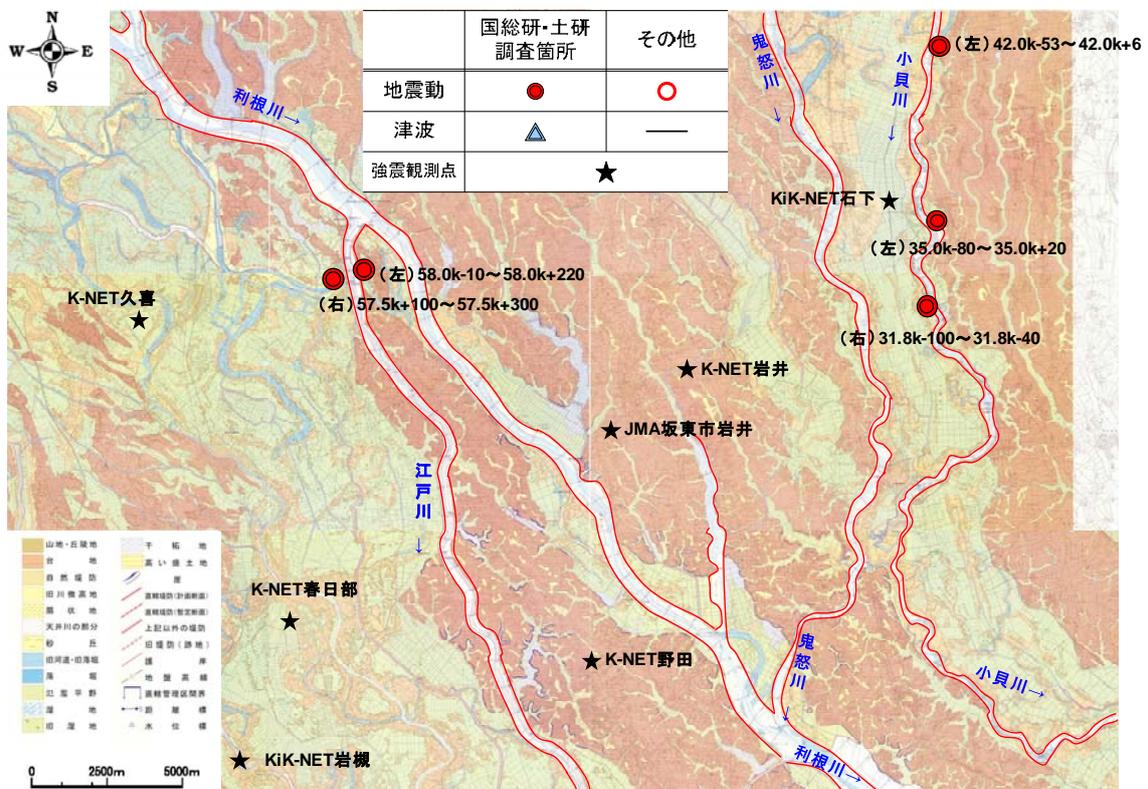


図-6.2(g) 江戸川、利根川、鬼怒川、小貝川における調査地点

6.2 地震動による河川堤防の被害

6.2.1 阿武隈川水系阿武隈川

(1) 阿武隈川下流左岸 28.6k+368～29.0k+94（宮城県角田市野田地先）

図-6.3 に平面図を示すように、延長約 330m にわたって複数の縦断亀裂やはらみ出しが発生した。特に大きな縦断亀裂は、天端の裏のり肩付近（写真-6.1）と裏小段付近の 2 本であり、のり肩の縦断亀裂は、大きなところで開口幅が 40 cm 程度あり、深さは 4m に達した。これに比べ裏小段の縦断亀裂はやや小さいが、小段の傾斜が逆勾配（写真-6.2）になり、窪んだところもあった。その沈下量は最大 1.5m 程度であった。なお、特記しない限り、本章に示す堤防の沈下量は堤防縦横断方向の中で比較的沈下量の大きい箇所での局所的な値である。写真-6.3 に示すように裏小段より下ののり面には複数の縦断亀裂とともに はらみ出しが生じていた。被災区間の堤防に並走する国道 113 号の路肩には堤防ののり尻から噴出したと思われる砂が堆積していたものの、路面等に亀裂、沈下、水平変位等の変状は確認されなかった。噴砂痕は路肩以外にも、裏小段や裏小段下ののり面の亀裂底面において多数確認されている。また、天端から表のり尻にかけて亀裂等の変状は確認されておらず、天端の沈下量も約 10 cm～20 cm と小さい。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.4 に示す。深度 15m 付近に砂層を挟むものの、基礎地盤は概ね軟弱粘性土からなる。地表付近には 1～2m の薄い砂層が存在する。堤体は、川裏側の小段より下の旧堤部分とそれ以外の新堤部分からなる。旧堤部分は、全体にゆるい砂質土となっており、新堤部分は N 値 10 前後の比較的よく締まった礫混じり砂となっている。現場でのヒアリングによれば、新堤部分の盛土材には山砂が用いられている。地震後の地盤調査結果からは、基礎地盤の圧密により堤体が基礎地盤にめり込むように沈下しており、最も沈下しているところで約 2m にもなることが明らかとなっている。

これより、堤体下部の飽和した領域のうち緩い砂質土からなる旧堤部分とその下の基礎地盤表層に分布する砂質土層が液状化したことが被害の原因であると考えられる。しかし、堤防周辺の堤内外の農地等に噴砂痕が確認されていないこと、堤防に並走する川裏側の国道路面に特段の変状が見られないことや天端の沈下量が小さかったことなどから、堤防川裏側の変状に対して、基礎地盤表層の砂質土層の液状化は変状にあまり寄与していない可能性もある。今後、噴砂の粒度特性等を詳細に分析する必要がある。一方、堤防のり肩の大きな亀裂は、旧堤部の変状に伴い発生したものと推定され、よく締固められた新堤部分は液状化しなかったものと考えられる。

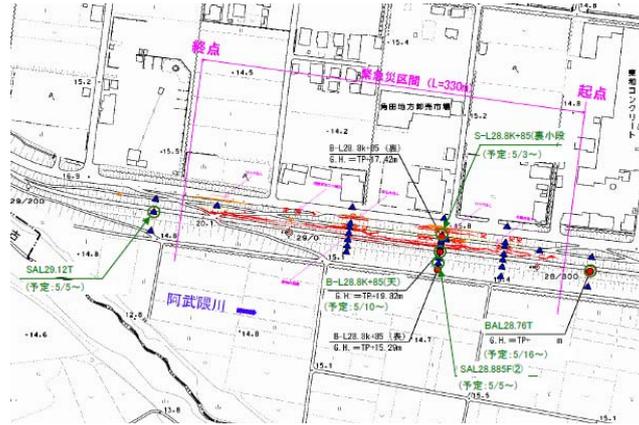


図-6.3 阿武隈川下流左岸 28.6k+368～29.0k+94（野田地先）の平面図(東北地方整備局提供)



写真-6.1 天端の縦断亀裂(東北地方整備局提供)



写真-6.2 裏小段の傾斜と縦断亀裂



写真-6.3 裏のり尻部の噴砂痕（ブルーシートの下に複数の縦断亀裂）

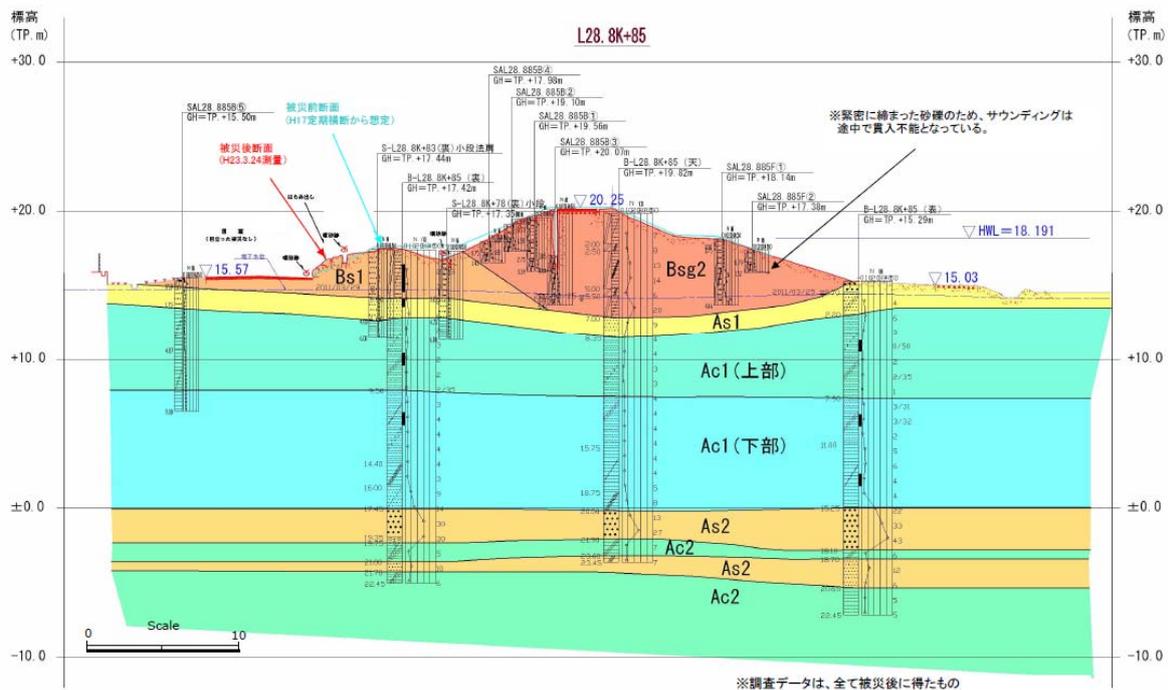


図-6.4 左岸 28.8k+85m (野田地先) の断面図(東北地方整備局提供)

(2) 阿武隈川下流右岸 30.6k+34～31.4k+160 (宮城県角田市枝野地先)

延長約 800m に渡り、沈下や縦断亀裂、はらみ出しが発生した。平面図を図-6.5 に示すように被災区間の中でも場所によって被害の状況は異なり、31.0k～31.2k+50m 付近に特に大きな変状が生じた。この付近では写真-6.4 に示すように、堤防天端に複数の縦断亀裂が生じ、裏のりに大きな水平変位が生じた。天端の沈下量は最も大きなところで約 2.9m である。また、裏のり尻部の水平変位量は 3m に達するところもあり、写真-6.5 に示すように場所によっては隣接する農地に崩壊した堤体土が覆いかぶさったり、堤防に並行する水路を閉塞したりしていた。このような大きくはらみ出したのり尻付近では崩壊した土砂から噴出したと思われる高含水の細砂が分布していたことが確認されている。他にも堤体の亀裂底部に多数の噴砂痕が確認されている。現地踏査時に、縦断亀裂内部および裏のり尻付近で採取した噴砂の粒径加積曲線を図-6.6 に示す。細粒分含有率 $FC=10\sim 20\%$ 程度であり、細砂主体の比較的均質な砂質土であることが分かる。なお、ほとんどの変状が表小段から川裏側にかけて確認されており、表小段から下には変状が見られなかった。さらに、のり尻近辺を除き、周辺の耕作地等において、特段の変状や噴砂痕は確認されていない。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.7 に示す。基礎地盤には層厚 15m 程度の軟弱粘性土が存在する。堤体は粘性土を主体とする旧堤とその後嵩上げ腹付された砂質土を主体とする新堤部分からなり、変状は新堤部分に集中していた。現場でのヒアリングによれば、新堤部分の盛土材には河床材が用いられている。また、堤体が軟弱粘性土地盤に下にめり込むように沈下していることと、新堤部分がかなり緩い状態であることが確認されている。

上記の被災状況及び地盤調査結果より、砂質土を主体とする新堤部分の地下水位より下の範囲が液状化したことが被災原因であると考えられる。

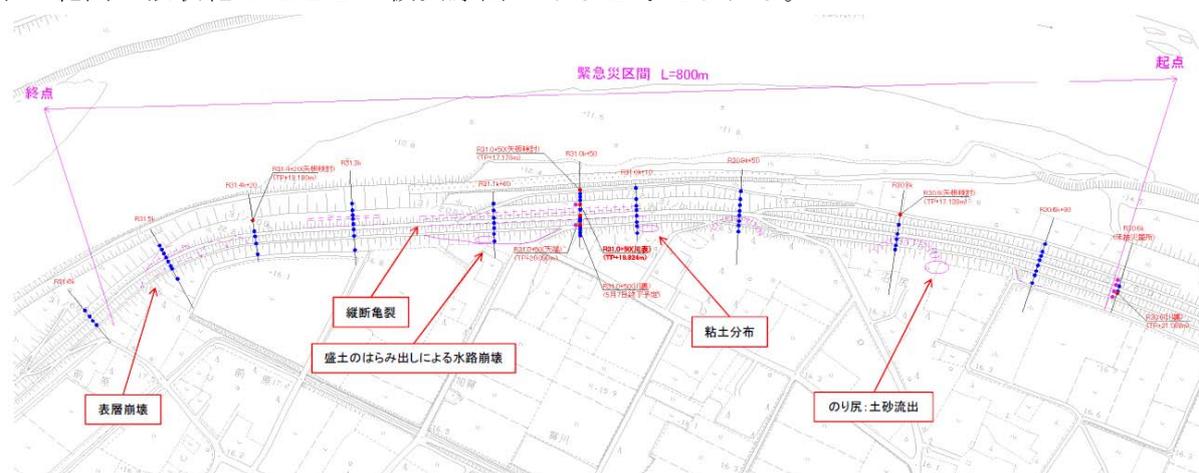


図-6.5 阿武隈川下流右岸 30.6k+34～31.4k+160 (枝野地先) の平面図(東北地方整備局提供)



写真-6.4 堤防天端の縦断亀裂と沈下



写真-6.5 裏のり尻部に隣接する農地を覆った崩土

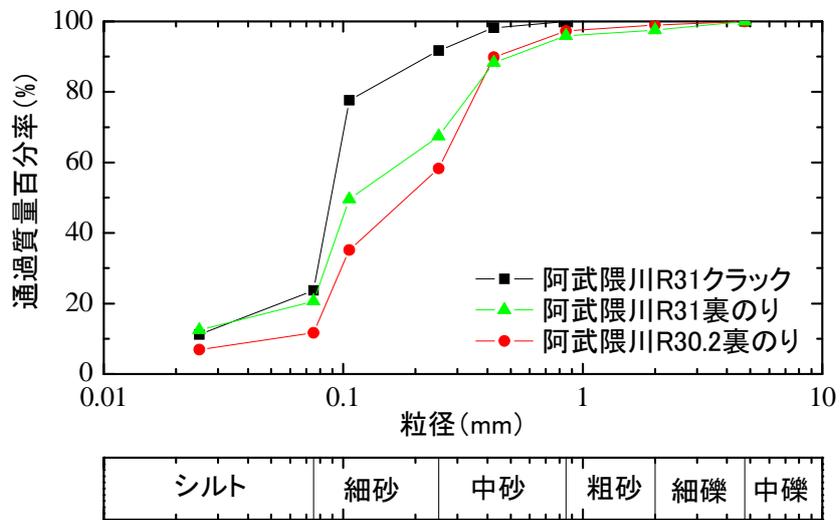


図-6.6 噴砂の粒径加積曲線

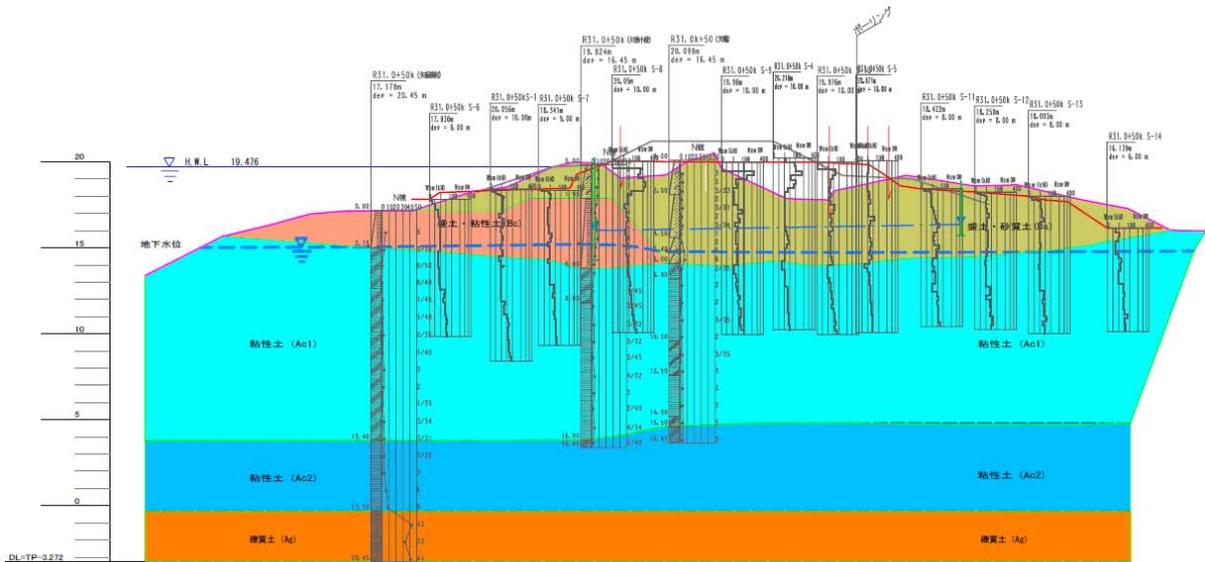


図-6.7 阿武隈川下流右岸 31+50k (枝野地先) の断面図(東北地方整備局提供)

(3) 阿武隈川下流右岸 32.8k+103～33.0k+170 (宮城県角田市小齊地先)

本区間は、裏のり尻部の道路と堤内側の水路が堤防と並走する区間とちょうど一致する(図-6.8)。堤防の表のり肩から道路を含む形で円弧状のすべり破壊が生じ(写真-6.6)、崩土が水路を閉塞した(写真-6.7)。堤防天端および道路の路面は川表側に向かって傾斜していた。被災区間の上流端では、道路のセンターラインのずれから、1m程度の水平変位が生じたことが分かる(写真-6.8)。沈下した堤防天端のアスファルト舗装の下に噴砂痕が見られた(写真-6.9)。表のりには特に変状が見られなかった。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.9に示す。枝野地先(右岸30.6k+34～31.4k+160)と同様に、基礎地盤は主として粘性土であり、堤防は粘性土による旧堤(川表側)、砂質土による新堤から構成されていることが分かる。また、堤体が基礎地盤にめり込むように沈下していることが分かる。現場でのヒアリングによれば、新堤部分の盛土材には河床材が用いられているようである。以上の状況から、主たる被災要因は新堤の堤体下部の液状化によるものと考えられる。



図-6.8 治水地形分類図¹⁾



写真-6.6 天端の沈下



写真-6.7 水路を閉塞した崩土



写真-6.8 道路のセンターラインのずれ



写真-6.9 天端アスファルトの下に見られた噴砂

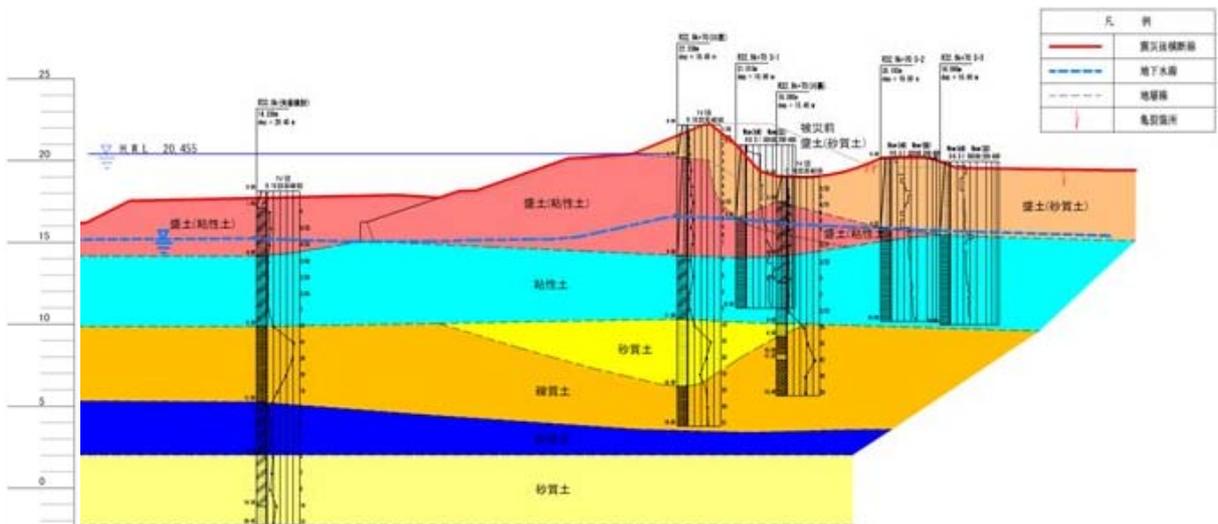


図-6.9 阿武隈川下流右岸 32.9k+70 (小斉地先) の断面図(東北地方整備局提供)

6.2.2 名取川水系名取川

(1) 名取川右岸 0.0k+17~0.6k+29 閑上特殊堤（宮城県名取市閑上）

本区間はコンクリート擁壁式の特設堤区間であり、下流側の端部に閑上水門が存在する。本区間の特設堤は、1978年宮城県沖地震により、擁壁継手部の開き、擁壁の亀裂・傾斜、パラペット背後の沈下・段差を生じた²⁾。うち、0.0k+17~0.2k+80(S53区間)については、1978年宮城県沖地震の前から嵩上げがなされており、さらに、1978年宮城県沖地震後の復旧として、前面側に擁壁が拡築されている。拡築された擁壁の基礎は $\phi 600\text{mm}$ 、単列の鋼管杭に支持されている(図-6.10)。また、0.2k+80~0.6k+29(S29区間)は木杭に支持されるコンクリート擁壁特設堤であり、この区間は1978年宮城県沖地震後に拡築がなされていない。

今回の地震では、写真-6.10に示すように、特設堤背面の土堤部を含む堤内地が津波による著しい侵食を受けた箇所が見られた。その上流側では、パラペット背後の地盤に50cm程度の沈下(写真-6.11)が生じた。ただし、アスファルト舗装が津波により流失している状況から、沈下量には津波による侵食の影響が含まれている可能性も考えられる。パラペット頂部には最大10cm程度の目地ずれが生じた(写真-6.12)。パラペットの目地ずれの状況は、S29区間、S53区間で大きな差は見られなかった。

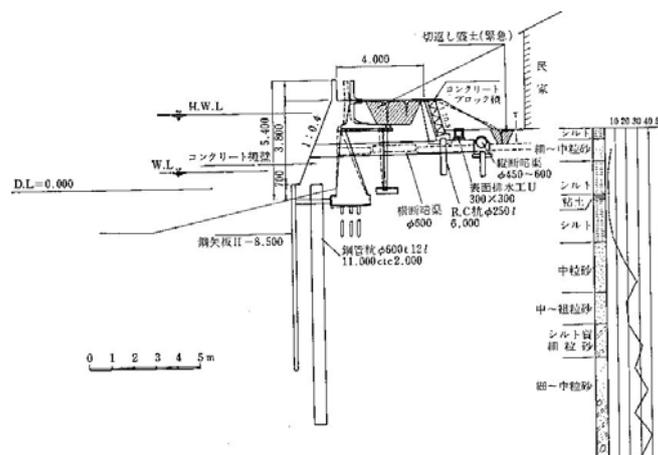


図-6.10 1978年宮城県沖地震における閑上特殊堤 0.0k+17~0.2k+80(S53区間)の被災・復旧断面図²⁾

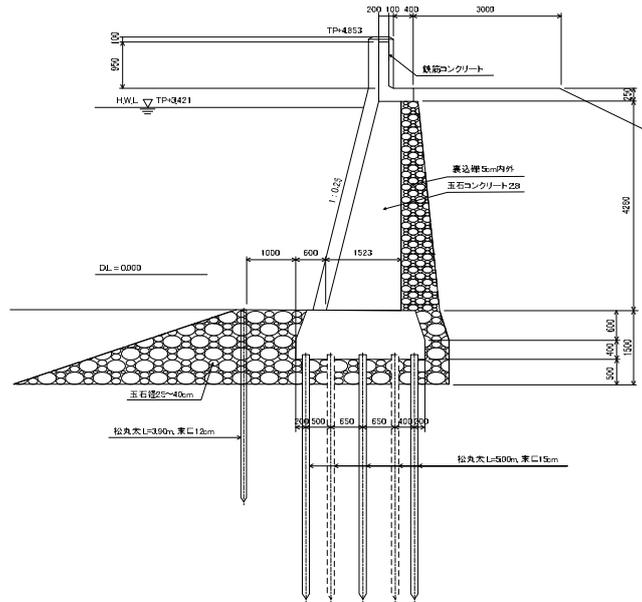


図-6.11 閑上特殊堤 0.2k+80～0.6k+29(S29 区間)の標準断面図(東北地方整備局提供を基に作図)



写真-6.10 津波による堤内地盤の侵食(閑上水門の直上流)



写真-6.11 パラペット背後の沈下



写真-6.12 パラペットの目地ずれ

6.2.3 鳴瀬川水系鳴瀬川

(1) 鳴瀬川左岸 11.3k+30～11.5k+100 (美里町砂山地先)

天端の表のり肩付近に横断方向の段差を伴って天端が沈下するとともに、のり尻部に水平変位が生じ、側道部分が隆起した。被災箇所の平面図は図-6.12 のとおりである。天端の沈下量は最大 2.4m であった。天端の沈下状況を写真-6.13 に、のり尻に並行する側道の隆起した状況を写真-6.14 に示す。隆起した側道の周辺では、噴砂痕が確認されている。なお、表のりには目立った変状は認められていない。図-6.13 に示すとおり本被災区間の治水地形分類は自然堤防に区分されているが、本区間は堤防～自然堤防縁端部までの距離がちょうど局所的に短くなっている箇所にあたり、一連の自然堤防の中でも基礎地盤の土層構成、密度、粒度組成等が異なっている可能性が考えられる。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.14 に示す。基礎地盤は、5～7m の粘性土層の上に、厚さ 2～4m の砂質土層が堆積している。その上に粘性土からなる旧堤があり、砂質土による腹付けが行われている。今回、大きな変状が生じたのは腹付部分であるため、堤体下部の液状化が主な要因と考えられるが、側道が隆起していることから基礎地盤表層の砂質土層の液状化による影響も疑われる。As1 層は一連の砂質土層として分類されているが、川表側と川裏側で土質が大きく異なる(図-6.15)。すなわち、川表側では細粒分が 60%～100%含まれており、液状化が生じにくいと考えられる一方で、川裏側では細粒分含有率が 30%程度であり、相対的に液状化が生じやすい土質であった。



図-6.12 鳴瀬川左岸 11.3k+30～11.5k+100 (砂山地先) の平面図(東北地方整備局提供)



図-6.13 治水地形分類図¹⁾



写真-6.13 天端の沈下



写真-6.14 側道脇の隆起と噴砂痕

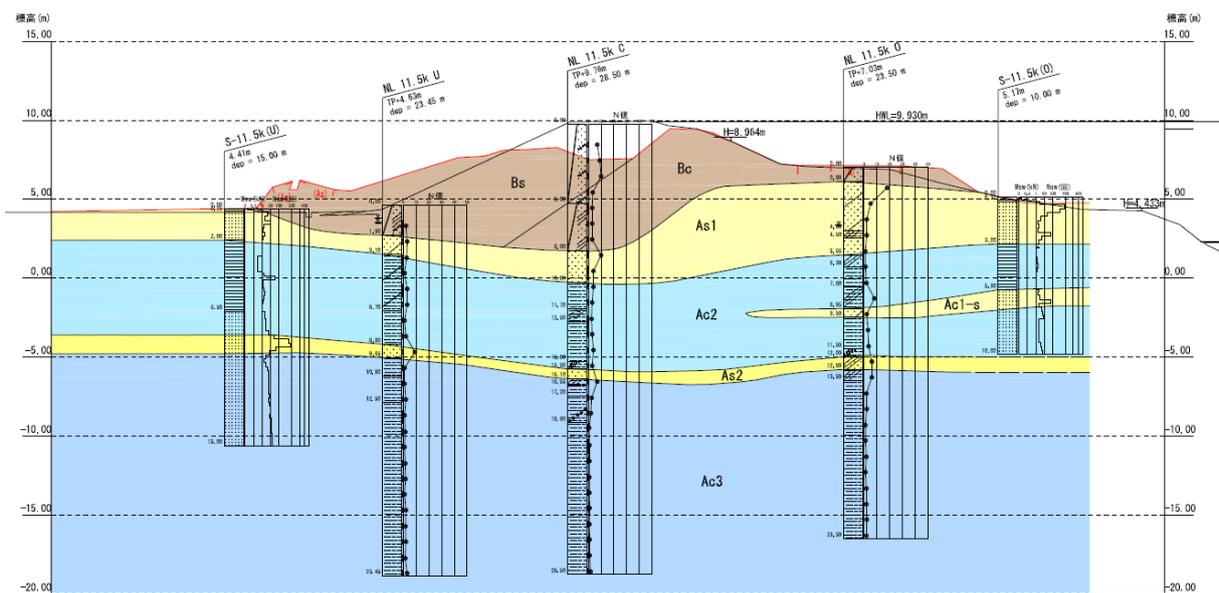


図-6.14 鳴瀬川左岸 11.5k (砂山地先) の断面図(東北地方整備局提供)

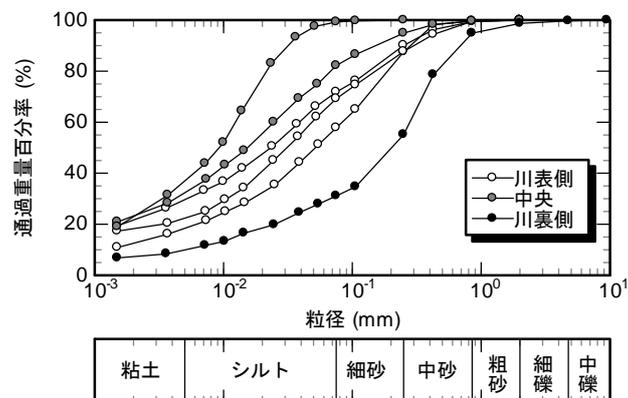


図-6.15 As1層の粒径加積曲線(鳴瀬川左岸 11.5k、東北地方整備局提供に基づいて作図)

(2) 鳴瀬川左岸 20.1k+130~20.3k+40 (宮城県美里町和多田沼)

天端に縦断亀裂、沈下および傾斜を生じた(写真-6.15)。裏小段に沿って縦断亀裂が生じており、天端の変状が著しい区間では、裏のり尻付近の堤脚水路に水平変位が生じていた(写真-6.16)。表のりはのり肩から中腹まで縦断亀裂を生じたが、のり尻付近には変状が見られなかった(写真-6.17)。本区間では堤体および周辺地盤に明確な液状化の痕跡は見られなかった。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.16 に示す。堤体材料は砂質土であり、その直下の基礎地盤は層厚 5m 程度の粘性土層である。



写真-6.15 天端の縦断亀裂、沈下および傾斜



写真-6.16 堤脚水路に生じた水平変位



写真-6.17 表のりの状況

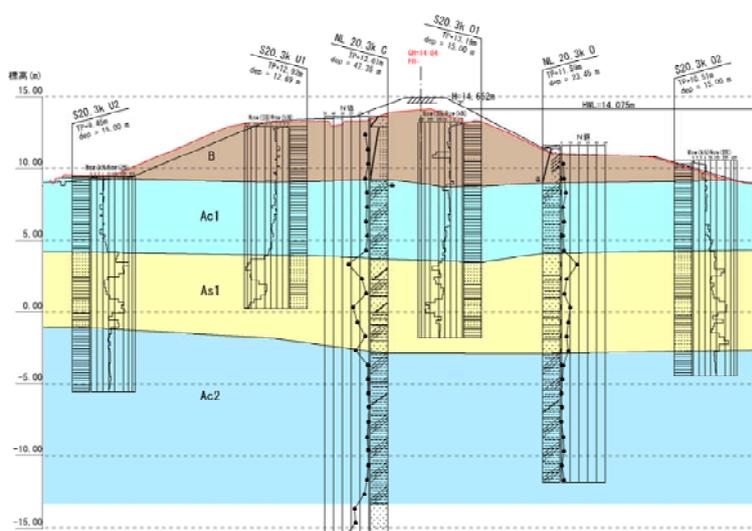


図-6.16 鳴瀬川左岸 20.3k(和多田沼地先)の断面図(東北地方整備局提供)

(3) 鳴瀬川右岸 29.7k+120～30.1k (宮城県大崎市松山下伊場野)

本区間の堤防の裏小段は兼用道路であり、その道路は志田橋に接続される。

写真-6.18 に示すように、表のり肩から裏のり尻にかけて堤防と兼用道路が大きく崩壊した。その崩土は隣接する民地の倉庫に達していた(写真-6.19)。裏のり尻にはブロック積み擁壁が設けられていたが、倒壊して崩土に埋もれていた(写真-6.20)。

図-6.16 に示す治水地形分類図によれば、当該区間の周辺は自然堤防であるが、被災区間の周辺のみ、局所的に氾濫平野とされている。



写真-6.18 堤防および道路盛土の崩壊



写真-6.19 民地に達した崩土



写真-6.20 裏のり尻のブロック積み擁壁の倒壊



図-6.17 治水地形分類図¹⁾

(4) 鳴瀬川左岸 30.0k~30.5k+37 (大崎市下中ノ目地先)

平面図を図-6.18 に示す。写真-6.21 に示すように天端が沈下し、表のり肩から裏のり尻にかけて堤体が大きく崩壊した。沈下量は最も大きいところで約 5.5m に達した。裏のりの堤体土は隣接する農地を覆うように崩壊した。縦断亀裂の中には堤体下方から噴出したと思われる水や高含水の砂質土が溜り(写真-6.22)、崩壊した土砂の端部にも高含水の砂が多数噴出していた。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.19 に示す。基礎地盤は粘性土と砂質土が互層に堆積したもので、地表面に近づくにつれ、粘性土が卓越する。表層は 4~5m の厚さの粘性土層となっており、これより下の砂質土層は、仮に液状化が生じたとしても堤体への影響はほとんどないものと考えられる。堤体は粘性土からなる旧堤と、砂質土で腹付・嵩上げした新堤部分からなる。基礎地盤の圧密沈下により堤体が基礎地盤にめり込むように沈下しており、堤体内に地下水位が存在する。粘性土層の上の砂質土からなる新堤部分に変状が集中していることから、堤体下部の液状化が被災原因であると考えられる。

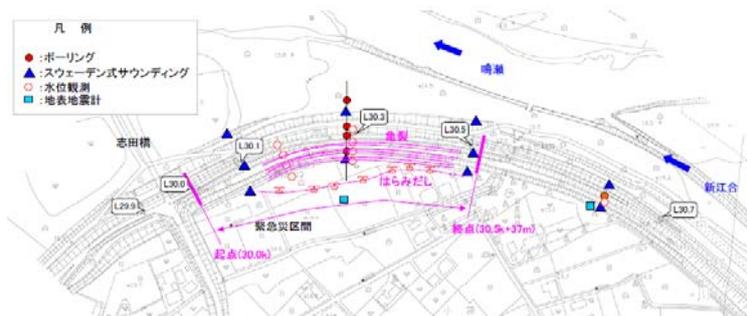


図-6.18 鳴瀬川左岸 30.0k~30.5k+37 (下中ノ目地先) の平面図(東北地方整備局提供)



写真-6.21 天端から裏のりにわたる崩壊



写真-6.22 縦断亀裂内の噴砂痕

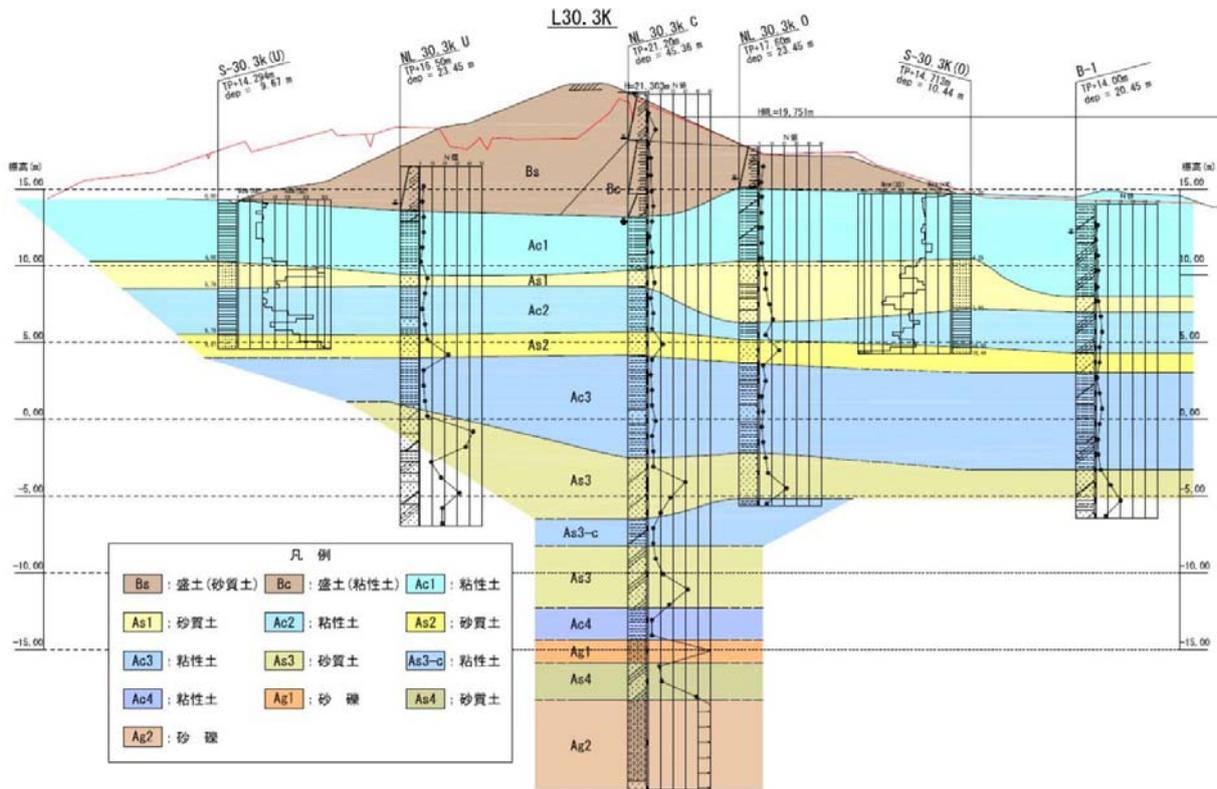


図-6.19 鳴瀬川左岸 30.3k(下中ノ目地先)の断面図(東北地方整備局提供)

6.2.4 鳴瀬川水系吉田川

(1) 吉田川左岸 14.6k+70～14.8k+20（宮城県大崎市鹿島台）

天端の状況を写真-6.23 に示す。天端が川表側への傾斜を伴って沈下し、裏のり肩付近の縦断亀裂が大きく開口していることが分かる。当該区間では川表側に護岸工が設置されており、護岸の基礎や周辺地盤部に水平変位、隆起等の変状は見られないが、写真-6.24 のように護岸の頂部が前傾し、大きな隙間が生じていた。これは、堤防が川表側にはらみ出しを生じたことを表しているものと考えられる。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.20 に示す。複雑な築堤履歴を有し、基礎地盤は粘性土が主体であるが、 N 値 4～7、層厚 3m 程度以下の砂質土層が介在することが分かる。



写真-6.23 天端の傾斜・沈下および裏のり肩の縦断亀裂の開口



写真-6.24 護岸頂部の前傾

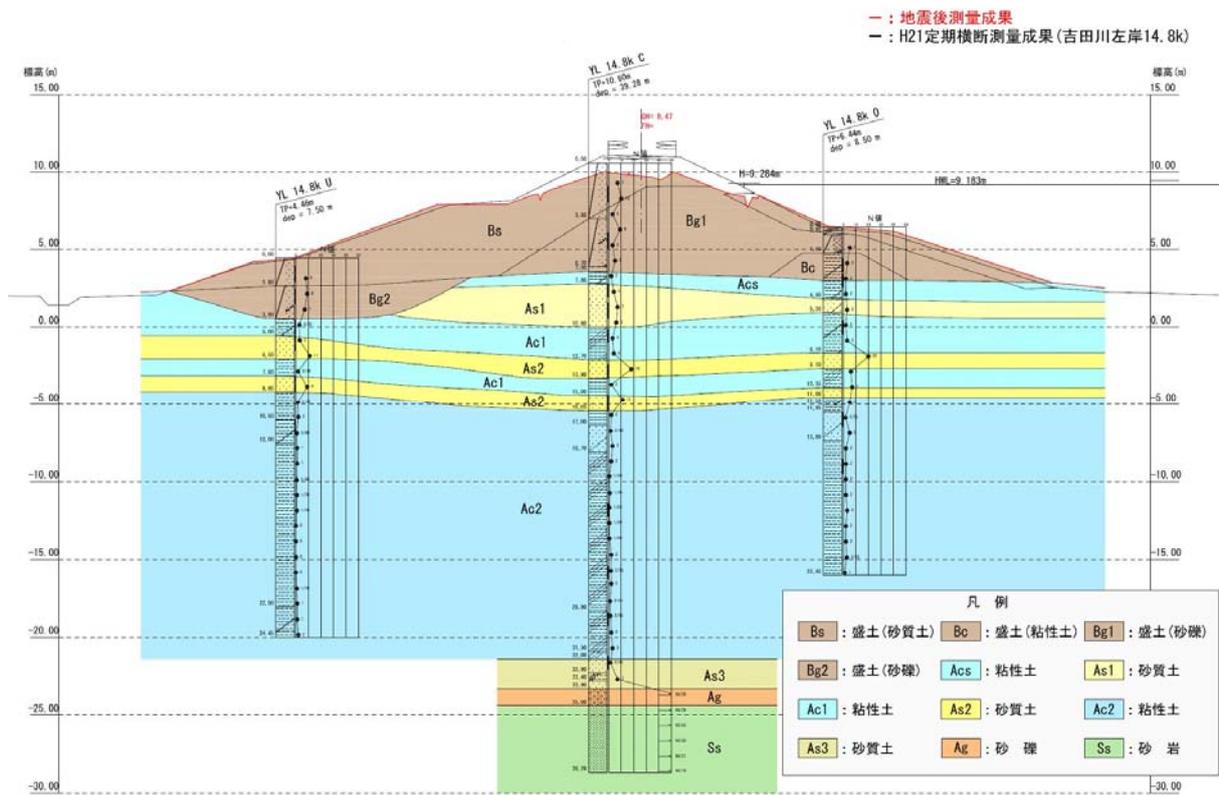


図-6.20 吉田川左岸 14.8k(大迫上志田地先下流)の断面図(東北地方整備局提供)

(2) 吉田川左岸 15.2k+170~15.4k+70 (宮城県大崎市鹿島台)

本区間では、天端の傾斜を伴う沈下および裏のり肩の縦断亀裂の開口(写真-6.25)、護岸上部の沈下が生じた(写真-6.26)。また、護岸下部が破損しており(写真-6.27)、堤防に川表側への水平変位が生じたことを示唆している。表のり尻周辺には噴砂の痕跡が見られた(写真-6.28)。

なお、1978年宮城県沖地震では、本区間とほぼ一致する左岸 15.2k+185~15.4k+104(当時の呼称は志田谷地第三堤防)では、幅 20~50cm、深さ 2m に達する縦断亀裂を生じ、切り返し、盛土、格子張り、止水矢板による復旧がなされている(図-6.21)²⁾³⁾。



写真-6.25 天端の傾斜・沈下および裏のり肩の縦断亀裂の開口



写真-6.26 護岸上部の沈下および表のり肩付近の沈下



写真-6.27 護岸下部の破損



写真-6.28 のり尻周辺に見られた噴砂痕

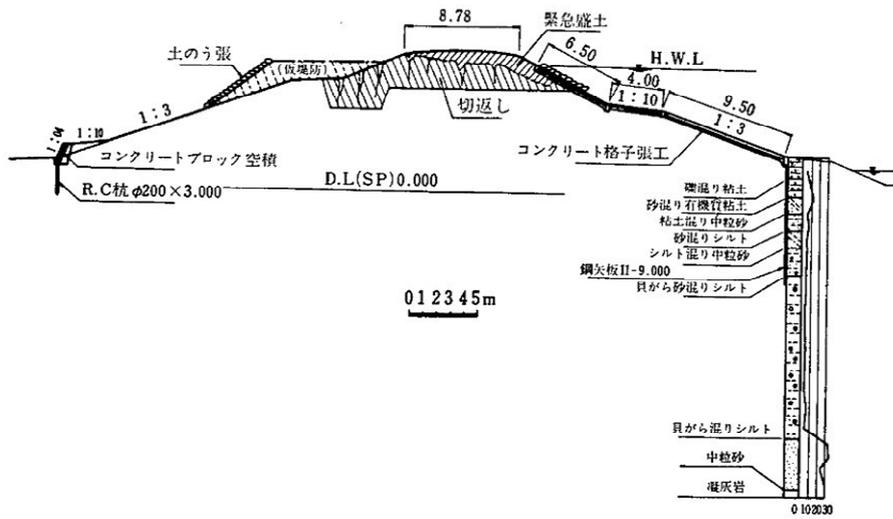


図-6.21 1978年宮城県沖地震による志田谷地第三堤防の被災・復旧断面図²⁾

6.2.5 北上川水系旧北上川

(1) 旧北上川右岸 20.0k~20.0k+70 (宮城県石巻市)

本区間周辺の治水地形分類図を図-6.22 に示す。本区間は氾濫平野に分類され、下流端は自然堤防と隣接している。

本区間では、天端に 1m 程度の沈下が生じた(写真-6.29)。天端および裏のりにいくつかの亀裂が見られたが(写真-6.30、写真-6.31)、沈下量の割に亀裂は軽微である。表のりの護岸下部には隙間が生じており(写真-6.32)、護岸の基礎に水平変位が生じたものと考えられる。

本区間周辺では表のり尻、裏のり尻、川裏側の耕作地内に噴砂痕が見られた(写真-6.33)。基礎地盤に液状化が生じたことで水平変位が生じ、護岸下部に隙間を生じさせたことが考えられ、基礎地盤の液状化が主たる被災要因となっているものと考えられる。



図-6.22 治水地形分類図¹⁾



写真-6.29 天端の沈下



写真-6.30 天端の縦断亀裂



写真-6.31 裏のりの亀裂



写真-6.32 護岸下部に生じた隙間



(a) 表のり尻部

(b) 裏のり尻部

(c) 川裏側の耕作地

写真-6.33 周辺で見られた噴砂痕

6.2.6 北上川水系江合川

(1) 江合川右岸 14.0k+43～14.6k+43 (宮城県涌谷町桜町)

本区間では、延長 600m 程度にわたって天端に縦断亀裂、沈下、陥没が生じた(写真-6.34)。写真-6.35 からは、天端には傾斜を伴う沈下が生じたことが分かるが、傾斜の方向は一様ではない。14.6k 付近に架かる上谷地橋の右岸側橋台アプローチ部には堤防の沈下に伴って 1m 以上の段差が生じ(写真-6.35)、橋台ウイングの端部が露出していた。

写真-6.37 より、表のり尻付近でのり面が急勾配化しており、堤体のはらみ出していることが分かる。ただし、一部では表のり尻付近の隆起も見られた。裏のり尻は崩壊し、崩土が隣接する民家に達したのも一部見られた(写真-6.37)。調査時点の 3 月 17 日では崩土をバックホウにより移設する作業が行われていたが、その崩土は含水量が多く、粘土質であった。

調査時には液状化の痕跡を確認することができなかったが、図-6.23 によれば、一部区間の基礎地盤に液状化の痕跡が認められたようである。表のり尻付近の基礎地盤には水たまりが多く見られるとともに(写真-6.34)、高含水状態にあり、地下水位が比較的高いことが推察された。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.24、堤体土および基礎地盤の粒径加積曲線を図-6.24 に示す。基礎地盤は 13m 程度より上方が粘性土主体であり、堤体土

はシルトが主体である。細粒分含有率 FC は堤体、基礎地盤ともに少なくとも 50%を超え、容易に液状化を生じるような砂質土は見当たらない。被災状況から、主たる変状は堤体に生じたものと考えられるが、堤体材料や基礎地盤の土質等について、今後、詳細な検討が必要である。

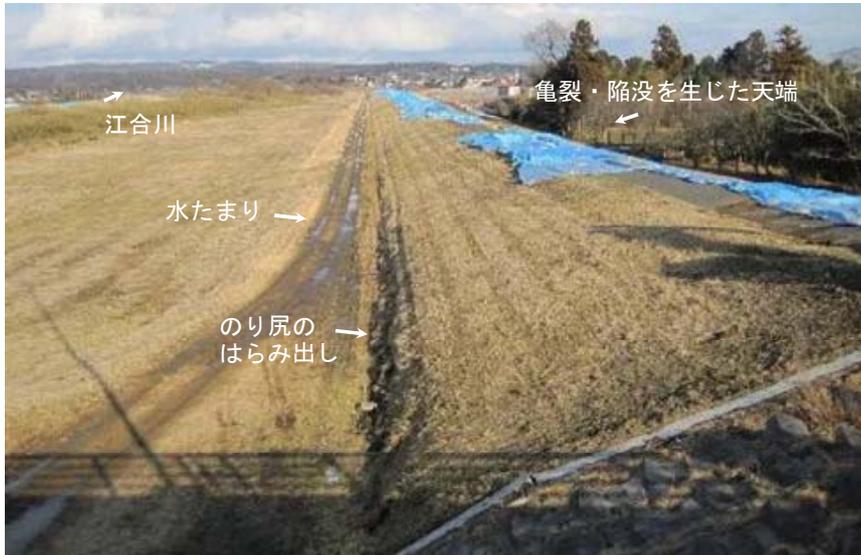


写真-6.34 天端および表のりの状況



写真-6.35 天端の状況



写真-6.36 上谷地橋の橋台アプローチ部に生じた沈下に



写真-6.37 表のり尻の状況



写真-6.38 裏のりの状況(撮影時は崩土を撤去済み)



図-6.23 被災区間周辺の平面図(東北地方整備局提供)

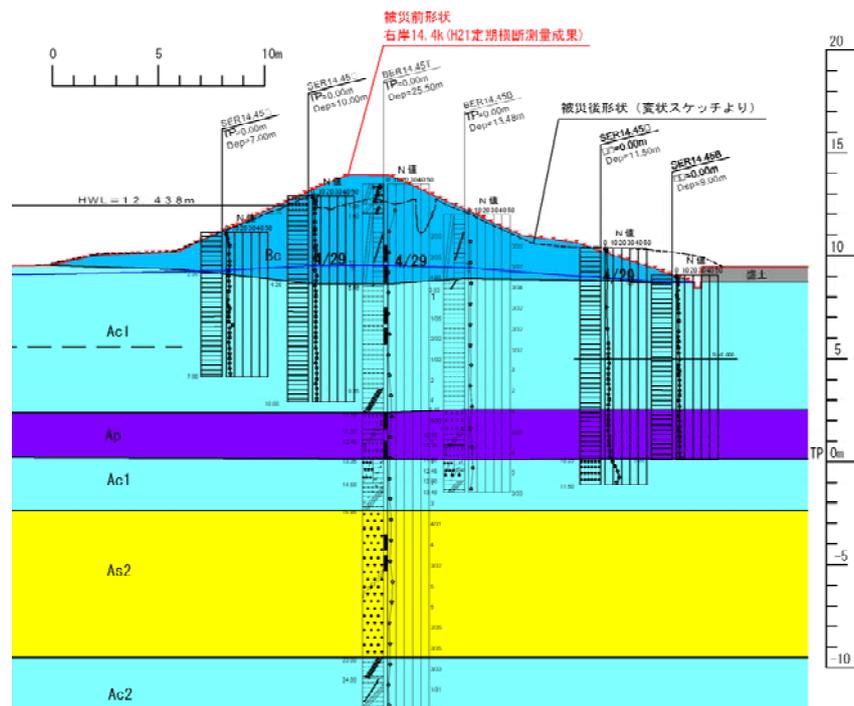


図-6.24 江合川右岸 14.4+50k(中島乙地先)の断面図(東北地方整備局提供)

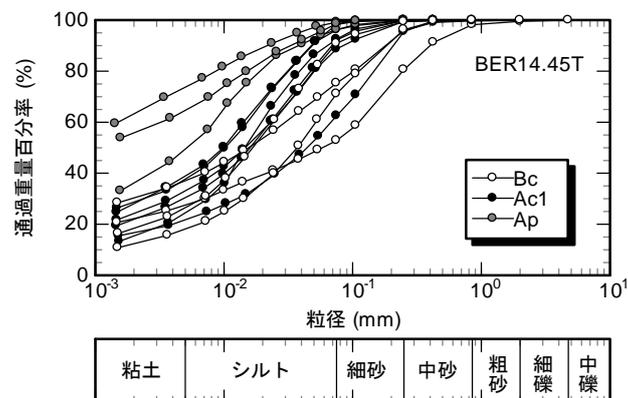


図-6.25 堤体土(Bc)および基礎地盤(Ac1、Ap)の粒径加積曲線(江合川右岸 14.4k、東北地方整備局提供資料に基づいて作図)

(2) 江合川左岸 14.0k+50～14.6k+100 (宮城県涌谷町上谷地)

本区間を含む左岸 14.4k+70～14.6k+10 では、1978 年宮城県沖地震により被害を生じ、切り返し、格子張り、止水矢板による復旧がなされている²⁾³⁾。

本区間では、延長 650m 程度にわたって天端に縦断亀裂、沈下、陥没が生じた(写真-6.39、写真-6.40)。天端から見た被災状況は対岸側(右岸 14.0k+43～14.6k+43)とよく類似しており、上谷地橋の左岸側橋台アプローチ部には 1m 程度の沈下が生じていた。ただし、左岸側では写真-6.40、写真-6.42 に示すように、裏のり中腹、裏のり尻に噴砂が確認されており、明らかに液状化が生じた点が異なる。

写真-6.39、写真-6.42 から分かるように、川表側、川裏側の両のり尻が大きくはらみ出し、堤体土が基礎地盤上面に乗り上げるように変形していた。このことから、主たる変形は堤体内で生じていたものと考えられる。地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.26 に示す。基礎地盤が粘性土から構成されるのは右岸 14.4k+50 と同様であるが、堤体が砂質土により構成される点が大きく異なる。基礎地盤の圧密沈下により堤体が基礎地盤にめり込むように沈下しており、堤体内に地下水位が観測されていることから、堤体下部の飽和砂質土に液状化が生じたことが主たる被災要因であると考えられる。



写真-6.39 天端および表のりの状況(上谷地橋から下流側を望む)



写真-6.40 天端の状況(上谷地橋から上流側を望む)



写真-6.41 裏のり中腹部の噴砂



写真-6.42 裏のり尻のはらみ出しおよび噴砂

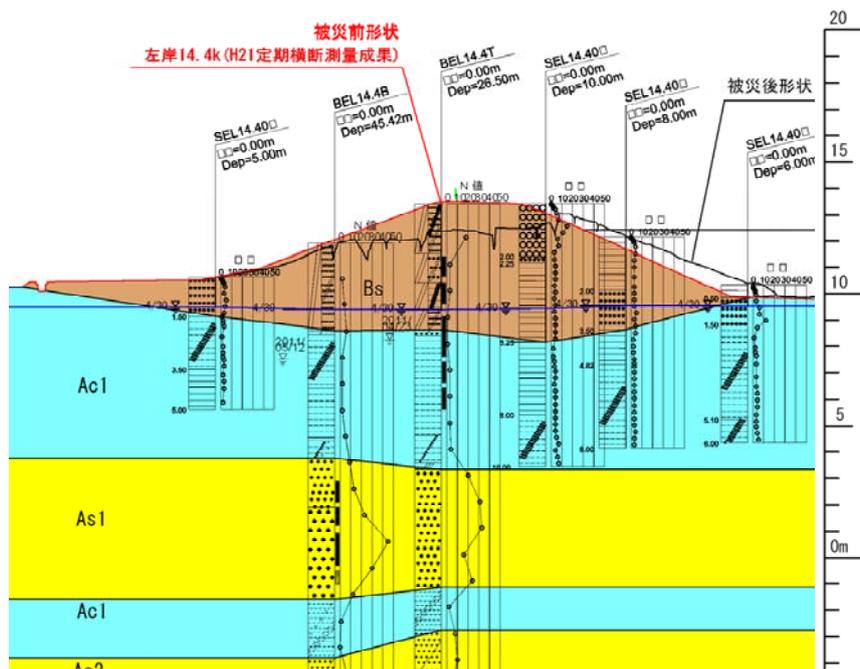


図-6.26 江合川左岸 14.4k(上谷地地先)の断面図(東北地方整備局提供)

(3) 江合川右岸 26.6k+115～26.8k+120（宮城県大崎市福沼）

本区間では、天端に著しい縦断亀裂を伴う沈下が生じた(写真-6.43)。堤防は川表側に崩壊しており、表のり尻部に噴砂が確認された(写真-6.44、写真-6.45)。裏のり尻付近には大きな変状が生じなかった。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.27に示す。土質試験結果より、堤体直下のAs1層は、川表側では細粒分が少なく、川裏側では細粒分を多く含んでいることが明らかとなっていることから、As1層のうち川表側付近で液状化が生じたことが主たる被災要因であると考えられる。ただし、堤体は基礎地盤の圧密沈下によりめり込んでおり、堤体内に水位が観測されること、崩土が周辺地盤を覆っていること、周辺地盤に水平変位や隆起等の変状が見られないことから、堤体自体の液状化の被害に影響した可能性も考えられる。



写真-6.43 天端の状況(東北地方整備局提供)



写真-6.44 表のり下部の崩壊(高橋章浩東京工業大学大学院准教授提供。対岸より撮影)



写真-6.45 表のり尻部の噴砂(東北地方整備局提供)

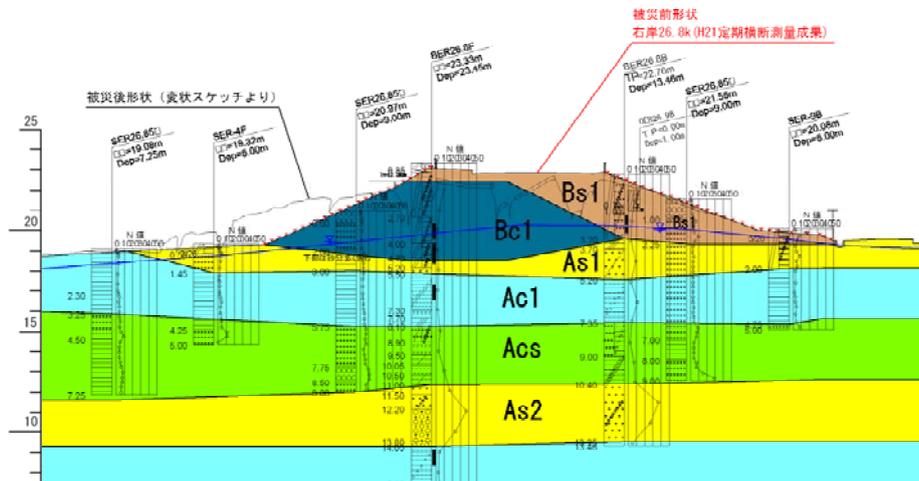


図-6.27 江合川右岸 26.8k+50(福沼地先)の断面図(東北地方整備局提供)

(4) 江合川左岸 27.4k+60~27.8k (宮城県大崎市湊尻)

本区間は堤防天端が兼用道路となっており、堤防天端が大きな縦断亀裂により寸断され、縦断亀裂に車両が落ち込んでいた(写真-6.46)。表のり肩の亀裂は噴砂により満たされていた(写真-6.47)。本区間に架かる江合橋の橋台アプローチ部には大きな段差が生じていた(写真-6.48)。表のり尻部には顕著なはらみ出しが見られ、表のり尻から1~2mの位置に噴砂痕が見られた。高水敷のテニスコートに不陸が生じており、基礎地盤に液状化が生じた可能性が考えられる。江合橋上流側の川裏側の民地において、液状化に起因すると考えられる地盤変状が生じていた(写真-6.49)。

なお、調査当時は、亀裂深さを調べるための天端のトレンチ掘削がちょうど行われており、掘削箇所を眺めたところ、細粒分を含まない砂とシルト質土が明瞭に分かれる箇所が確認された(写真-6.50)。大きく粒度の異なる堤体材料が使用されており、堤体内が相当に不均質であることが分かった。

地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図-6.28に示す。同図より、基礎地盤が粘性土あるいは互層、堤体が砂質土であり、さらに地下水位が堤体内に確認される。本区間の堤内地は造成盛土であるが、緊急復旧後の4月7日(最大余震の前)の状況を示した

写真-6.51 を見ると、護岸ブロックの下部から水のしみ出しが見られることから、造成盛土から地下水が供給され、堤体内の水位は常時より高い状態にあったものと推察される。これらより、堤体下部の飽和域に液状化が生じた可能性が考えられる。また、高水敷に噴砂が見られたことから、川表側の基礎地盤にも液状化の発生が疑われる。以上より、堤体下部の液状化が被害の主要因であると考えられるが、基礎地盤の液状化も被害に影響したものと考えられる。



写真-6.46 天端および表のりの状況（江合橋から下流側を望む）



写真-6.47 のり肩に達した噴砂



写真-6.48 江合橋の橋台アプローチ部に生じた段差



写真-6.49 川裏側の民家付近の地盤変状

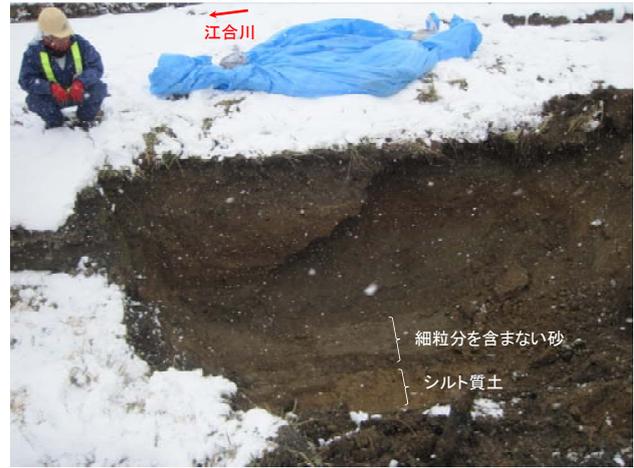


写真-6.50 トレンチ掘削状況(江合橋上流側の天端)

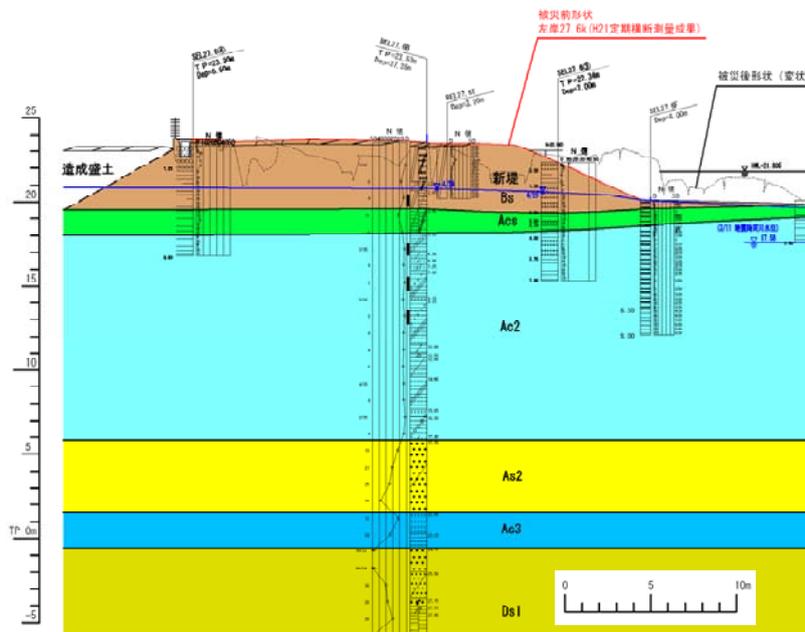


図-6.28 江合川左岸 27.6k(浏尻地先上流)の断面図(東北地方整備局提供)



写真-6.51 護岸下部からの水のしみ出し

6.2.7 北上川水系新江合川

(1) 新江合川右岸 2.8k+25~2.8k+195 (宮城県大崎市楡木)

堤防天端に縦断亀裂および陥没が生じた(写真-6.52)。裏のり尻の水路には、土砂が落下した箇所が見られたが(写真-6.53)、水路に変位が生じた様子は確認されなかった。川表側では、のり肩付近が亀裂の開口を伴って急勾配化、のり面中腹で緩勾配化、のり尻部で急勾配化しており、一部では護岸下部が著しく前傾していた(写真-6.54、写真-6.55)。護岸下部の状況の模式図を図-6.29に示す。変状の著しい箇所ではのり枠が曲げ破壊し、護岸ブロックとともに前傾していた。堤体下部のはらみ出しが原因として考えられる。

現地踏査時には本区間で液状化の痕跡が見られなかったが、積雪のため十分に把握できていない可能性もある。



写真-6.52 天端の状況



写真-6.53 裏のり尻部の水路内に落下した土砂

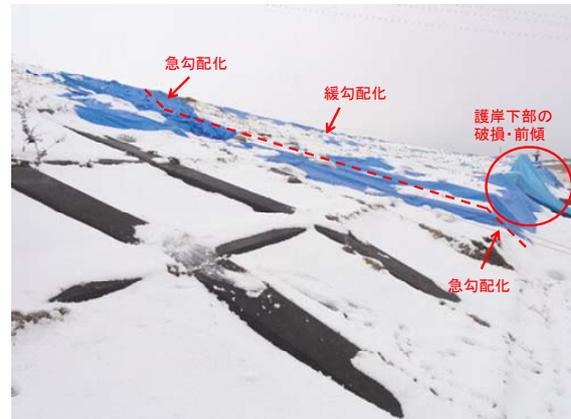


写真-6.54 表のりの状況



写真-6.55 護岸下部の前傾

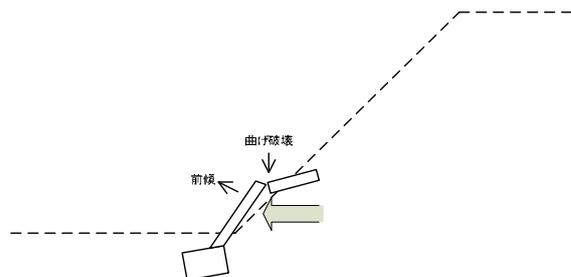


図-6.29 護岸下部の被災状況の模式図

6.2.8 久慈川水系久慈川

(1) 久慈川左岸 18.5k-172~18.5k+124 (茨城県常陸太田市松栄町地先)

天端の状況を写真-6.56、概略の被災状況に関する断面図を図-6.30、被災箇所の平面図を図-6.31 に示す。本区間では、延長 300m 程度にわたって天端に縦断亀裂、沈下が生じた。写真-6.56 のとおり、天端の縦断亀裂はセンターラインより川表側に集中して発生した。

図-6.32 に示す治水地形分類図より、本区間の大部分は氾濫平野、下流側の一部は旧河道に位置することが分かる。



写真-6.56 天端の状況 (関東地方整備局提供)

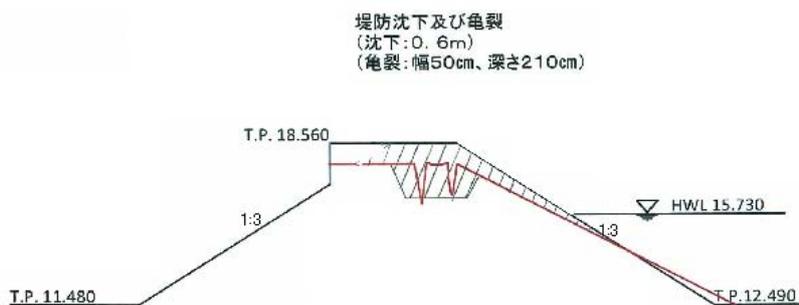


図-6.30 概略被災状況図 (関東地方整備局提供)

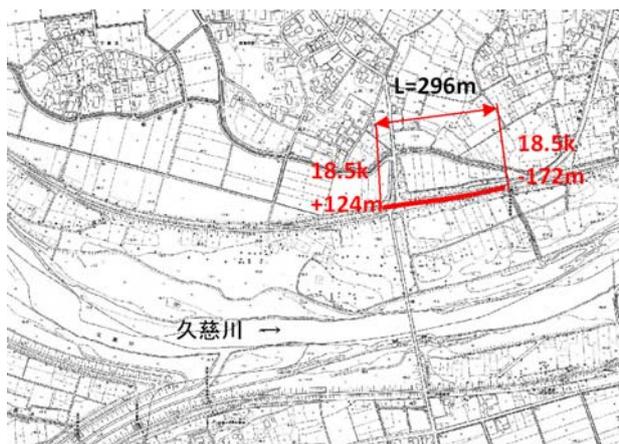


図-6.31 被災箇所の平面図(関東地方整備局提供)



図-6.32 治水地形分類図¹⁾

6.2.9 久慈川水系里川

(1) 里川左岸-1.0k+151~-1.0k+254 (茨城県常陸太田市落合町地先)

当該区間では、延長 103m にわたって堤防に被害が生じた。写真-6.57 に示すとおり、天端は堤防延長方向に波打つように沈下した。沈下量は、最も大きいところで 1.6m 程度である。写真-6.57 および写真-6.58 のとおり、表のり、裏のりのいずれにも縦断亀裂が生じており、亀裂の深さは最大 90cm 程度、幅は 30cm 程度であった。

本区間付近の治水地形分類図を図-6.33 に示す。被災区間は氾濫平野に分類されているが、背後に旧堤が存在することから、被災区間が旧河道である可能性も考えられる。



写真-6.57 天端の状況 (関東地方整備局提供)



写真-6.58 裏のり肩の段差を伴う天端の沈下 (関東地方整備局提供)



図-6.33 治水地形分類図¹⁾

6.2.10 那珂川水系那珂川

(1) 那珂川右岸 4.5k-190~4.5k-40 (茨城県水戸市下大野地先)

天端の状況を写真-6.59、被災区間の平面図を図-6.34、被災区間の航空写真を写真-6.60、概略の被災状況を表す断面図を図-6.35に示す。

本区間では、延長 150m 程度にわたって天端に縦断亀裂、沈下が生じるとともに、表のりおよび裏のりにはらみ出しが生じた。天端の中央部には大きな縦断亀裂が開口し、亀裂の底には噴砂が溜まっていることが分かる。また、写真-6.60 に示す航空写真からは、表のり尻付近および堤内地盤に多数の噴砂痕が確認される。

図-6.36 に示す治水地形分類図によれば、本区間は自然堤防ないしは旧河道に位置する。



写真-6.59 天端の状況(関東地方整備局提供)

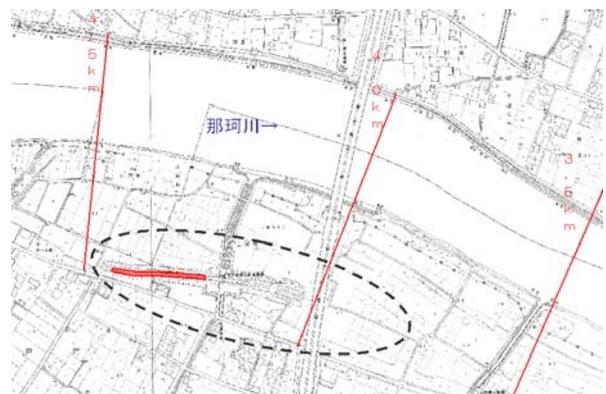


図-6.34 被災箇所 の平面図(関東地方整備局提供)



写真-6.60 被災区間の航空写真(関東地方整備局提供)

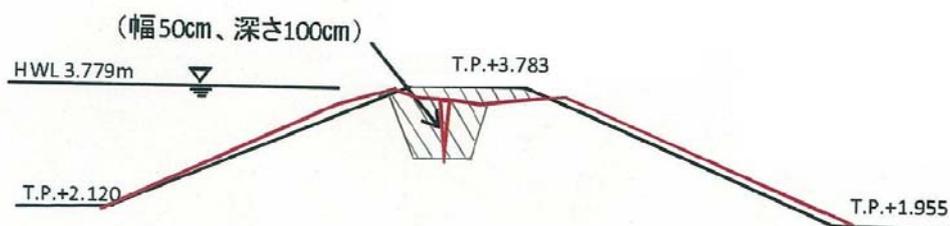


図-6.35 概略被災状況図(関東地方整備局提供)



図-6.36 治水地形分類図¹⁾

6.2.11 利根川水系利根川

(1) 利根川左岸 18.5k+100~19.0k-11 (茨城県神栖市横瀬地先)

当該区間では、延長 389m にわたって堤防に被害が生じた。写真-6.61 に示すとおり、利根川と常陸川に挟まれた区間である。天端では、段差を伴う縦断亀裂および沈下が見られた。天端に見られる段差は 1~2m 程度、亀裂深さは最大で 3m 程度であった。また、写真-6.62 のとおり、高水敷に噴砂が確認された。



写真-6.61 天端の段差を伴う沈下 (関東地方整備局提供)



写真-6.62 高水敷の噴砂痕

(2) 利根川右岸 70.5k-158~71.0k (千葉県印旛郡栄町三和)

本区間では、延長 633m にわたって天端の沈下および縦断亀裂が生じた(写真-6.63)。道路として利用されている裏小段は、上面が川側に傾斜しつつ沈下し(写真-6.64)、裏のり尻付近では堤体の表面がめくれ上がりつつ落下するように崩壊した箇所、裏のり尻部の基礎地盤が隆起した箇所が見られた(写真-6.65)。また、階段工に大きな変状が見られた(写真-6.66)。

被災箇所の平面図を図-6.37、治水地形分類図を図-6.38 に示す。治水地形分類図によ

れば、被災区間は利根川右岸の将監川と長門川に囲まれた氾濫平野の中に形成された自然堤防に位置する。



写真-6.63 天端の沈下(関東地方整備局提供)



写真-6.64 裏小段の状況(関東地方整備局提供)



写真-6.65 裏のりの崩壊および裏のり尻部の隆起(関東地方整備局提供)



写真-6.66 階段工の変状(関東地方整備局提供)

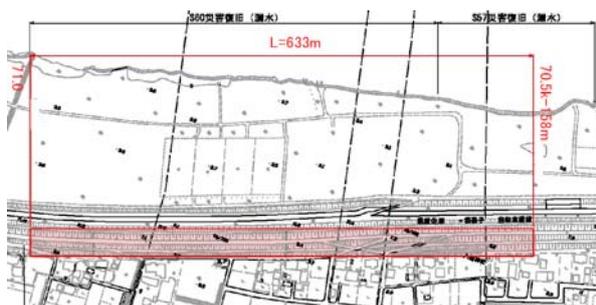


図-6.37 被災箇所 の平面図(関東地方整備局提供)



図-6.38 治水地形分類図¹⁾

6.2.12 利根川水系霞ヶ浦

(1) 常陸川左岸 1.0k~1.5k (茨城県神栖市横瀬地先)

前述の利根川左岸 18.5k+100~19.0k-11 の対岸に位置する本区間では、延長 500m にわたって堤防に被害が生じた。写真-6.67 に示す区間の上流側では、天端の沈下および縦断亀裂が見られた。亀裂の深さは 1.5m、幅は 1m 程度であった。一方、写真-6.68 に示す区間の下流側では、天端の沈下量が大きいところで 60cm 程度であった。また、本区間内の樋門では、写真-6.69 および写真-6.70 に示すとおり、抜け上がりが生じた。ヒアリングによると、この樋門は杭基礎により支持されており、周辺堤防の沈下にともなって抜け上がりが生じたものと考えられる。

本区間付近の治水地形分類図を図-6.39 に示す。常陸川と利根川の合流地点近傍であり、旧河道が広く存在している。本区間は砂丘、旧河道ないしは氾濫平野に分類されている。



写真-6.67 天端の沈下および縦断亀裂(関東地方整備局提供)



写真-6.68 天端の沈下(関東地方整備局提供)



写真-6.69 樋門周辺堤防の抜け上がり(関東地方整備局提供)



写真-6.70 樋門の抜け上がり(関東地方整備局提供)

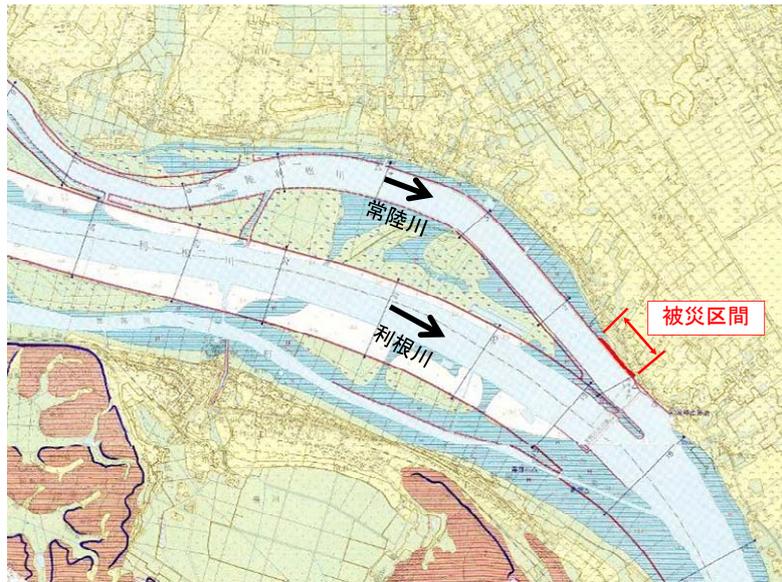


図-6.39 治水地形分類図¹⁾

(2) 横利根川左岸 2.75k-70~2.75k+30 (千葉県香取市)

本区間は掘込み河道に矢板護岸が設けられ、その背後には高さ 60cm の堤防が設けられている。矢板護岸に水平変位が生じ、矢板護岸背後のブロックに変状が生じるとともに、堤防天端に沈下、縦断亀裂、沈下、陥没が生じた(写真-6.71~写真-6.73)。矢板護岸の水平変位が特に顕著な区間では、堤防天端が沈下し、水没した箇所も見られた。堤内地側には数多くの噴砂と亀裂が確認された(写真-6.73)。

被災箇所の平面図を図-6.40、治水地形分類図を図-6.41 に示す。横利根川は霞ヶ浦(西浦)と利根川を結ぶ河川であり、本区間は旧湿地とされている。



写真-6.71 矢板護岸の水平変位と天端の沈下(関東地方整備局提供)



写真-6.72 矢板護岸背後のブロックの変状(関東地方整備局提供)



写真-6.73 天端に生じた亀裂(関東地方整備局提供)



写真-6.74 堤内地の噴砂・地割れの状況



図-6.40 被災箇所周辺の平面図(関東地方整備局提供)



図-6.41 治水地形分類図¹⁾

(3) 西浦右岸 3.75k+100～5.25k+80 (茨城県稲敷市本新地先^{もとしん})

本区間では、延長 1,480m にわたって天端に縦断亀裂、沈下および段差が生じた(写真-6.75)。沈下量は、最も大きいところで 1.2m 程度であった。また、写真-6.76 のとおり、護岸の変状、表のり尻の噴砂が確認された。裏のり尻では、隆起とともに縦断亀裂が生じた(写真-6.77)。



写真-6.75 天端の縦断亀裂、沈下および段差(関東地方整備局提供)



写真-6.76 表のり護岸の変状および噴砂痕(関東地方整備局提供)



写真-6.77 裏のり尻付近の隆起(関東地方整備局提供)

6.2.13 利根川水系小貝川

(1) 小貝川左岸 35.0k-80～35.0k+20 (茨城県つくば市上郷地先^{かみごう})

当該区間では、延長 100m にわたって堤防に被害が生じた。天端には、写真-6.78 に示す幅 6cm 程度の横断亀裂や、写真-6.79 に示す裏のり肩の縦断亀裂が生じた。また、写真-6.80 および写真-6.81 に示すとおり、裏のり面や裏小段にも縦断亀裂が見られた。堤体に生じた縦断亀裂は、深さ最大約 2m であった。また、高水敷に深さ最大約 1m の亀裂が生じており、噴砂痕も確認された。堤内地側では、写真-6.81 に示すとおり、裏のり尻付近及びその周辺に、深さ最大 1.3m の亀裂が確認された。川裏側の農地には、旧河道に沿って弧を描くような噴砂跡が確認され(写真-6.82)、噴砂の土粒子は粒径が小さく均一であった。ヒアリングによると、堤内地側には噴砂とともに水たまりも多数確認されており、本区間では基礎地盤の液状化が発生したと考えられる。

治水地形分類図を図-6.42 に示す。本区間の堤内地に名残川が存在し、旧河道である可能性が考えられる。



写真-6.78 天端の横断亀裂(関東地方整備局提供)



写真-6.79 裏のり肩の縦断亀裂(関東地方整備局提供)



写真-6.80 裏のりの亀裂(関東地方整備局提供)



写真-6.81 裏小段の亀裂(関東地方整備局提供)



写真-6.82 裏のり尻付近の亀裂



写真-6.83 堤内地の噴砂痕



図-6.42 治水地形分類図¹⁾

(2) 小貝川左岸 42.0k-53~42.0k+6 (茨城県つくば市安食)

本区間では、延長 60m 程度にわたり、裏のり肩の沈下、裏のり尻のはらみ出しが生じた(写真-6.84、写真-6.85)。主として天端が取り残され、裏のり肩から堤内側のみが沈下するような変状の形態であったが(写真-6.86)、一部では天端の陥没を伴う箇所もあった(写真-6.87)。裏のり尻にははらみ出しが生じた(写真-6.88)。

被災箇所の平面図を図-6.43、治水地形分類図を図-6.44、概略の被災状況に関する断面図を図-6.45 に示す。治水地形分類図によれば、本区間は自然堤防に位置するが、下流端は旧河道に近いことが分かる。



写真-6.84 裏のりの状況(下流側、関東地方整備局提供)



写真-6.85 裏のりの状況(上流側、関東地方整備局提供)



写真-6.86 裏のり肩～裏のりの沈下(関東地方整備局提供)



写真-6.87 天端の状況(関東地方整備局提供)



写真-6.88 裏のり尻のはらみ出し

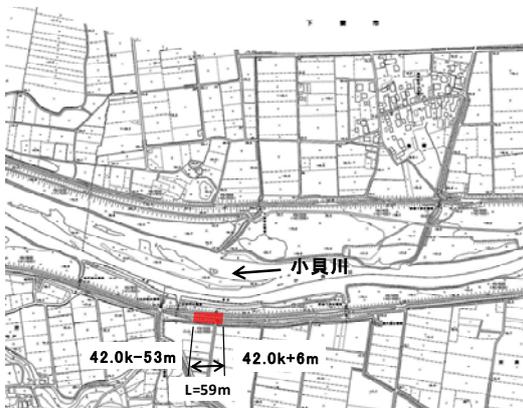


図-6.43 被災箇所の平面図(関東地方整備局提供)



図-6.44 治水地形分類図¹⁾

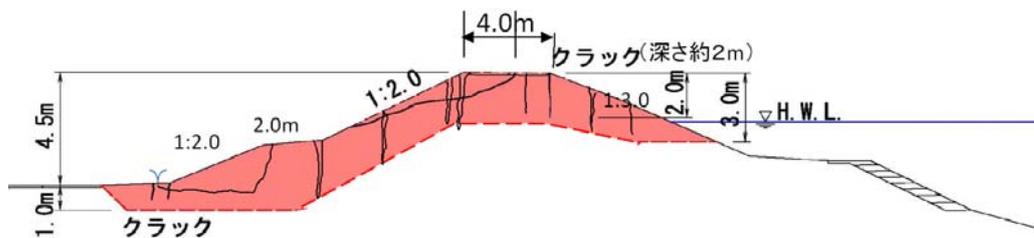


図-6.45 概略被災状況図(関東地方整備局提供)

(3) 小貝川左岸 42.0k-85 吉沼用水樋管（茨城県つくば市安食）

吉沼用水樋管（土地改良区管理）では、堤防天端に沈下が生じるとともに、管理橋の端部が落座していた(写真-6.89)。翼壁の天端部には若干の沈下が見られた(写真-6.90)。樋門およびゲートの外観については、特に損傷は見当たらなかった。川裏の堤脚部に設置されている水路には、水路の浮き上がりが生じた(写真-6.91)。付近の堤内地盤では噴砂が生じていた(写真-6.92)。



写真-6.89 堤防天端および管理橋



写真-6.90 翼壁天端部の沈下



写真-6.91 水路の浮き上がり



写真-6.92 堤内地側の噴砂痕

6.2.14 利根川水系江戸川

(1) 江戸川右岸 57.5k+100~57.5k+300（埼玉県幸手市）

本区間では、延長 200m にわたって裏のりが崩壊した(写真-6.93)。兼用道路(県道 268号西関宿・栗橋線)として利用されている裏小段は、センターラインに沿う大きな段差を伴う沈下を生じた(写真-6.93)。裏のり尻付近では、亀裂に分断された堤体土の間から高含水の粘性土がたまっている箇所があった(写真-6.94)。

被災箇所周辺の平面図を図-6.46、治水地形分類図を図-6.47、概略の被災状況に関する断面図を図-6.48 に示す。被災箇所は幸手放水路からの洪水を江戸川本川に排水する中川上流排水機場の上流側であり、旧河道がちょうど堤防に近接する区間と一致している。



写真-6.93 裏のりの変状 (関東地方整備局提供)



写真-6.94 裏小段の段差を伴う沈下 (関東地方整備局提供)



写真-6.95 裏のり尻付近の亀裂と高含水の粘性土 (関東地方整備局提供)

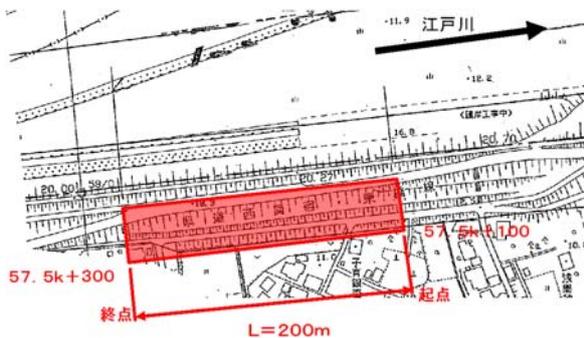


図-6.46 被災箇所周辺の平面図 (関東地方整備局提供)



図-6.47 治水地形分類図¹⁾

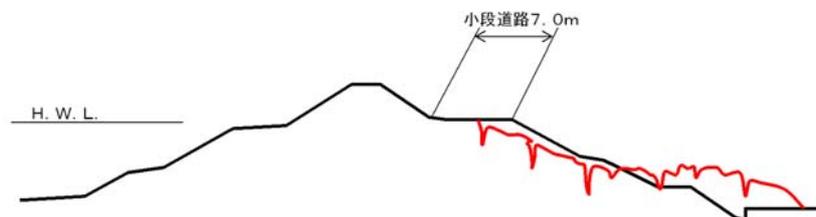


図-6.48 概略被災状況図 (関東地方整備局提供)

(2) 江戸川左岸 58.0k-10~58.0k+220 (千葉県野田市)

本区間は堤防高さが 10m 程度であり、表のりの勾配が 4 割の緩傾斜となっている。天端には変状が見られなかったが、延長 230m にわたって表のりに段差を伴う沈下が生じた(写真-6.96)。表のり尻部では、縦断亀裂から多数の噴砂が生じた(写真-6.97)。現地での

ヒアリングによると、表のりの亀裂内に噴砂が確認されたようである。また、ヒアリングによると、本震翌日の3月12日に掘削した箇所から湧水が確認されており、液状化に伴う過剰間隙水圧が地盤内に残留していた可能性が考えられる。

本区間付近の治水地形分類図を図-6.49に示す。被災区間は主として台地、下流側の端部付近が旧河道とされているが、利根川からの分流地点に近く、旧河道が複雑に存在している。なお、被害は緩勾配の表のりに生じたことから、台地にて液状化が生じたと解するのは適切でないと考えられる。



写真-6.96 表のりの段差を伴う沈下（関東地方整備局提供）



写真-6.97 表のり尻部の噴砂痕（関東地方整備局提供）

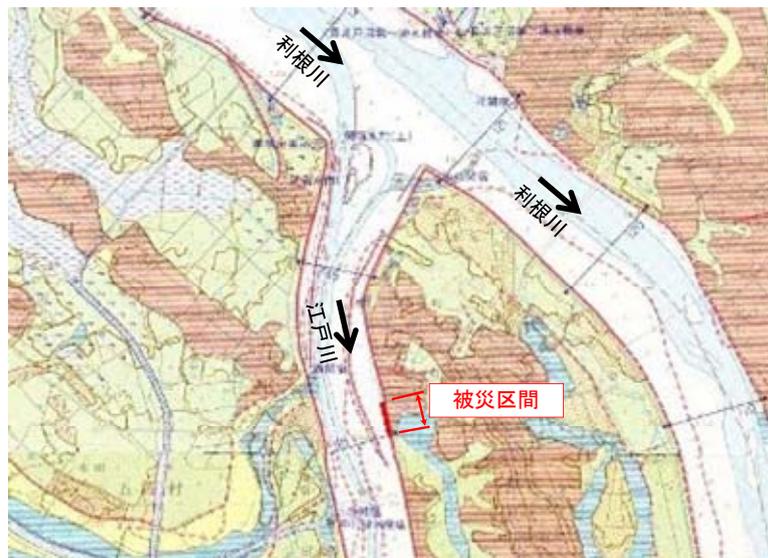


図-6.49 治水地形分類図¹⁾

6.2.15 浸透対策・耐震対策された堤防の状況

(1) 鳴瀬川右岸 0.7k 付近

1995年兵庫県南部地震以降に進められた堤防の耐震対策として、裏小段にサンドコンパクションパイル工法による対策が実施された箇所である。改良幅は5.8m、改良率は10.3%である。図-6.50に示すように、厚さ3-4mの砂層(As1)が存在し、この層が液状化することによって生じる被害を抑制するために裏小段の直下にサンドコンパクションパイルを施工したものである。

本地点では、対策工の効果を確認することを目的として地震計と間隙水圧計が同一断

面内に設置されている。2003年7月宮城県北部の地震においては、対策範囲・無対策範囲において過剰間隙水圧の上昇に差が生じるなど、締固め改良の効果が確認されている(13)14)15)。

今回の地震においては、天端に津波による漂流物が見られ、対策区間の下流端で越水によりり尻部に落堀が形成されのり面が浸食された箇所(写真-6.99)があるなど、津波による影響は見られたものの、天端、裏のりには地震動による変形の痕跡や亀裂等の発生は認められなかった(写真-6.98、写真-6.100、写真-6.101)。対策区間の表のりや対策区間の上下流の堤防にも地震動による変状は確認されなかった。

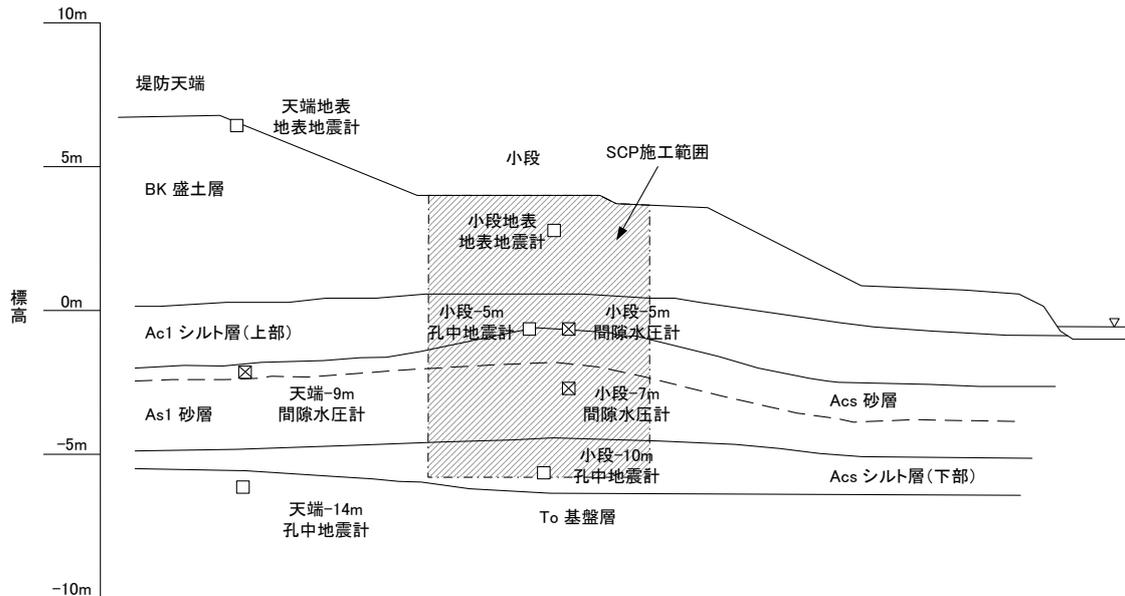


図-6.50 鳴瀬川右岸 0.0k (中下震動観測所付近) の断面図



写真-6.98 天端の状況



写真-6.99 対策区間下流の津波越流による浸食の状況



写真-6.100 裏小段の状況



写真-6.101 裏のり尻付近の状況

今回の地震においては、観測小屋が津波を受けたこともあり、改良範囲内の地震計、間隙水圧計の記録が得られなかったが、天端地表の地震計、天端-9mの間隙水圧計、天端-14mの地震計については、本震の記録が得られている。得られた記録の時刻歴波形を図-6.51に示す。HA、HB、UDは、それぞれ堤防縦断方向、堤防横断方向、上下方向を表し、初期有効上載圧 σ'_{v0} は、地震前の地下水位がAc1層上面にあったものと仮定して算出したものである。2003年宮城県北部の地震の際と同様、残念ながら過剰間隙水圧の値は 82kN/m^2 付近でレンジオーバーとなっている。

加速度波形の概略の包絡形状に着目すると、宮城県内における他の強震記録と同様に2つの大きなフェーズが見られる。過剰間隙水圧は、フェーズ1で天端に大きな加速度が生じた33秒付近、40秒付近で急激に上昇し、その後、地震動が一度小さくなりかけた70秒付近まで、過剰間隙水圧がやや減少するものの、 45kN/m^2 程度の過剰間隙水圧（過剰間隙水圧比0.38程度）を保持したままフェーズ2を迎えていることが分かる。フェーズ2の途中で間隙水圧の計測値がレンジオーバーとなっているため、過剰間隙水圧がどこまで上昇したかは不明であるが、間隙水圧計が裏のり肩の直下に位置しているため初期せん断の影響により過剰間隙水圧が上昇しにくいと考えられること、地震動による堤防の変状が見られなかったことから考えると、液状化の発生には至っていない可能性が考えられる。

ここで、東北地方で観測された2つのフェーズの地震動の間で過剰間隙水圧が残留していたという事実が観測記録に基づいて明らかになったことは、重要な事実である。過剰間隙水圧の消散速度はその地盤の透水性や土層構成により異なるが、東北地方における他の堤防が甚大な被害を受けた原因として、1つ目のフェーズの地震動によって堤体ないしは基礎地盤が液状化し、高い過剰間隙水圧が残留した状態で2つ目のフェーズの地震動を受けたことが考えられる。

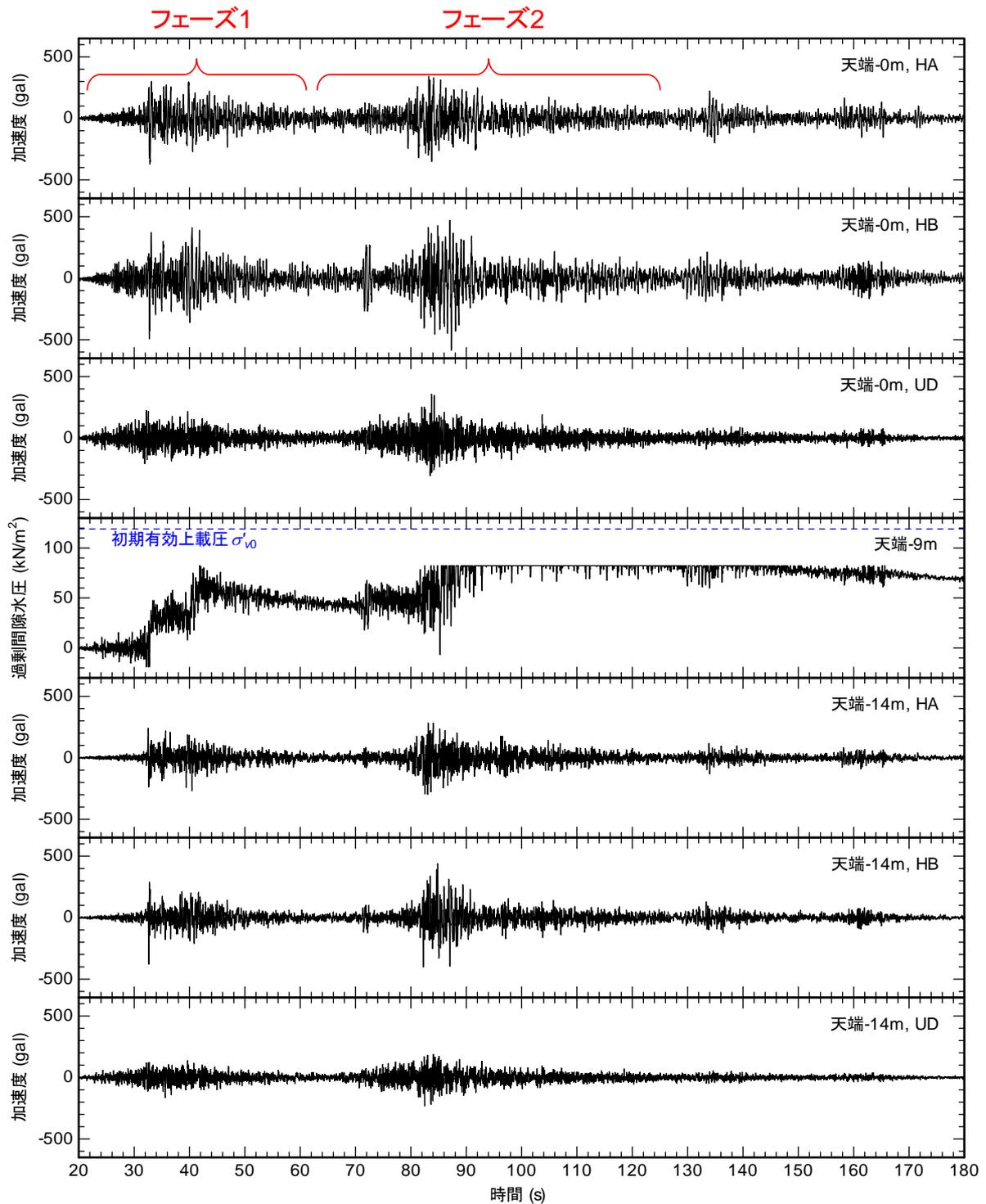


図-6.51 本震の観測記録

(2) 鳴瀬川右岸 14.7k+90～14.9k+70 付近（宮城県大崎市鹿島台木間塚地先）

2003年7月宮城県北部の地震において、両のり肩付近に深さ2m程度の比較的大きな縦断亀裂が生じ、天端が数十cm沈下した。再度災害防止の観点から基礎地盤を浅層改良するとともに、改良土による堤体の全面切り返し、裏のり尻へのドレーン工の設置がなされた(写真-6.102)。対策区間の平面図を図-6.52に示す。

今回の地震では、対策区間に被害は見られず、隣接する上下流の堤防において縦断亀

裂や天端の沈下(写真-6.103)、のり尻部の護岸の隆起(写真-6.104)が発生した。このため、基礎地盤の浅層改良、堤体改良、裏のり尻のドレーンによる対策効果が発揮されたことが分かる。ただし、対策実施区間と隣接する無対策区間の境界付近には、写真-6.105に示すような複数の横断亀裂が発生した。これは、対策の実施に際して、何らかの緩衝区間を設けるなど端部処理の必要性を示唆するものである。

なお、鳴瀬川左岸12.1k付近～12.5k付近(砂山地先)、鳴瀬川左岸12.7k付近～13.5k付近(二郷地先)、鳴瀬川右岸12.9k+61～13.1k+9.8(木間塚地先)についても同様に、2003年7月宮城県北部の地震により被災し、堤体改良、浅層改良、裏のり尻のドレーンの設置等による対策がなされた。これらの区間では、前後区間も含めて今回の地震における特段の変状が見られなかった。

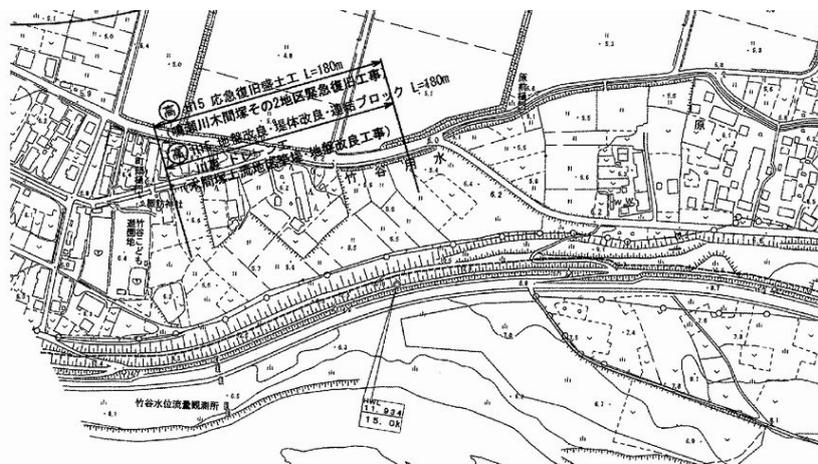


図-6.52 鳴瀬川右岸 14.7k+90～14.9k+70 付近(木間塚地先)の対策区間平面図(東北地方整備局提供)



写真-6.102 対策区間(写真奥ののり尻にドレーンが設置されている区間)



写真-6.103 対策区間に隣接する堤防の沈下(写真手前は対策区間)



写真-6.104 無対策区間における高水護岸の隆起



写真-6.105 対策・無対策区間の境界付近に発生した複数の横断亀裂（手前が対策区間）

(3) 鞍坪川右岸 0.4k~0.6k 付近（宮城県東松島市）

2003年7月宮城県北部の地震において、堤防天端に縦断亀裂が生じ、表のりがはらみ出した。復旧では、堤体の部分切返しとともに、裏のり尻部にドレーン工が設置された。対策区間の平面図を図-6.53に示す。

今回の地震では、写真-6.106に示すように、ドレーン工が設置された裏のりには目立った変状が見られなかったが、2003年と同様、堤防天端の縦断亀裂と表のりのはらみ出しが生じた。写真-6.107のとおり、隣接するドレーンを設置していない区間もドレーンを設置した区間とほぼ同じような被害が見られたが、変状を詳細に比較すると、堤防天端の傾斜や縦断亀裂の大きさ、のり肩部の小規模崩壊の状況は、ドレーン設置区間の方がやや軽微であった。基礎地盤の違いや堤体土の土質、施工等の影響も考えられるが、ドレーン工設置によって堤体内水位の低下、のり尻付近の過剰間隙水圧の消散促進、のり尻の抑え効果が期待されるため、上記のような差異が生じた可能性がある。今後、当該地点だけでなく、他の同様の対策実施箇所も含めて、さらなる詳細な分析が必要である。

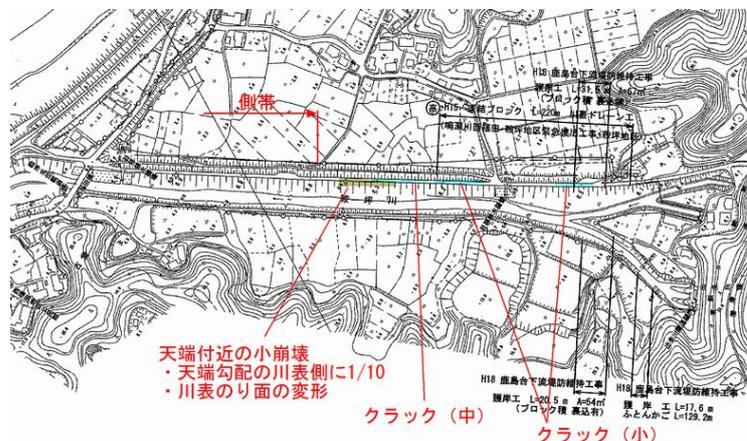


図-6.53 鞍坪川右岸 0.4k~0.6k 付近のドレーン工設置箇所の平面図(東北地方整備局提供。赤字は 2003 年宮城県北部の地震による被災状況)



写真-6.106 ドレーン工設置状況



写真-6.107 天端の傾斜（写真奥がドレーン工設置区間。手前より傾斜が緩い）

6.2.16 地震動による堤防の被災パターン

今回の地震で見られた地震動による堤防の大規模被害について、被災パターンを大別すると以下の2つが考えられる。

1) 堤体下部の液状化

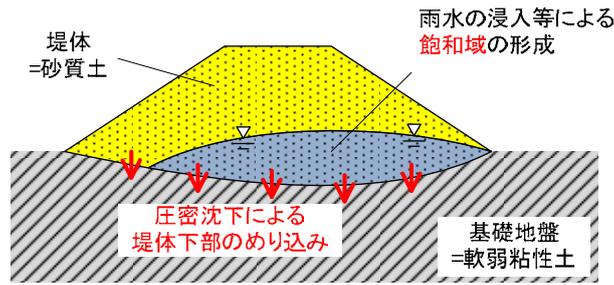
堤体下部の液状化による被災メカニズムの模式図を図-6.54に示す。このような被害は、堤体が砂質土、堤体直下の基礎地盤が軟弱粘性土層から構成される場合に見られ、次のようなメカニズムにより変状が生じたものと考えられる。

- (a) 地震前より、圧密沈下等によって堤体下部が基礎地盤にめり込むように沈下している。基礎地盤の透水性が低いため、この領域には、主として雨水浸透により溜まった間隙水が排出されにくい。飽和域の上面もサクシヨンの影響によって水平とはならず、飽和域の形状はレンズ状となる。実際には度重なる築堤履歴により堤体土は均質でないため、堤体下部の飽和した砂質土は川表側あるいは川裏側のみに偏在することもある。
- (b) 地震動によって堤体下部の飽和砂質土が繰返しせん断を受け、過剰間隙水圧の上昇とともにその剛性・強度が低下する。特に、堤体下部の砂質土がゆるい場合は、飽和域の砂質土が流動的に変形する。
- (c) 堤体下部の飽和域の液状化により、大きな初期せん断応力が作用している堤体のり尻付近に水平変位が生じ、飽和域より上方の堤体土が水平方向に伸張変形する。このため、のり面、のり肩、天端にわたって堤防縦断方向の亀裂が発生する。のり尻部の水平変位が小さい場合はのり尻付近がはらみ出す程度の変状にとどまるが、のり尻付近の水平変位が大きい場合、亀裂が進展して飽和域より上方の堤体土がいくつかの土塊に寸断される。この天端付近の土塊が沈下・傾斜することで、天端に陥没・傾斜を生じることがある。また、変状を生じたのり尻付近から液状化した堤体下部の砂質土が流出して噴砂として見られる場合や、開口した亀裂に液状化した堤体下部の砂質土が貫入し、沈下した元の天端付近やのり肩、のり面付近に噴砂として見られる場合がある。

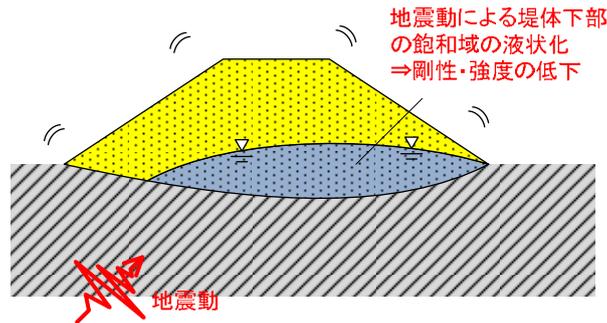
この被災メカニズムは、1993年釧路沖地震における釧路川堤防の被災調査に基づいて佐々木ら⁴⁾⁵⁾により見出されたものであり、2003年十勝沖地震における牛首別川堤防、礼作別川堤防⁶⁾など、いくつかの事例が確認されている。また、2003年7月宮城県北部の地震における鳴瀬川の堤防については、事前降雨により湿潤した堤体下部の液状化が被災要因とされている⁷⁾⁸⁾。

今回の地震において、このパターンに該当するものの例としては、阿武隈川下流の枝野地先(6.2.1(2))および小斉地先(6.2.1(3))、鳴瀬川の下中ノ目地先(6.2.3(4))、江合川の上谷地地先(6.2.6(2))などが挙げられ、特に東北地方整備局管内の堤防で多く見られた点が特徴的である。これらはいずれも、軟弱粘性土地盤上の砂質土による堤体が沈下によりめり込み、その下部に地下水位が存在することが地震後の地盤調査により明らかであり、のり尻部の崩壊あるいははらみ出しを伴う大規模な被害が見られた。

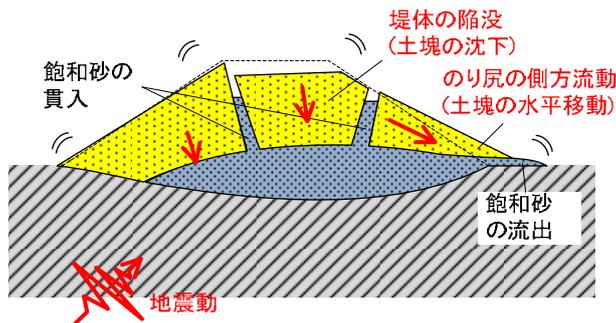
これに対し、阿武隈川下流左岸の野田地先では、よく締め固められた良質材が用いられた新堤部分においては、堤体下部の液状化被害が軽減された可能性が考えられる。また、鳴瀬川右岸の木間塚地先では、浅層改良、堤体改良および裏のり尻へのドレーン工の設置により、前後区間に被害を生じつつも対策区間内では変状が見られなかった。これらの対策を震前に行うことは、堤体の大規模な開削を要することもあり困難であるが、地震被害後の復旧工法の検討を行うにあたっては、今後の参考とすべき好例である。



(a) 地震前



(b) 地震発生～液状化発生



(c) 液状化発生～変状の進展

図-6.54 堤体下部の液状化による被災メカニズム

2) 基礎地盤の液状化

基礎地盤の液状化による被災メカニズムを模式的に図-6.55 に示す。このような被害は、基礎地盤が砂質土から構成される場合に見られ、次のようなメカニズムにより変状が生じたものと考えられる。

- (a) 地震動によって基礎地盤の飽和砂質土が繰返しせん断を受け、過剰間隙水圧の上昇とともにその剛性・強度が徐々に低下する。
- (b) 基礎地盤の剛性・強度が低下することで、堤体の自重により基礎地盤が鉛直方向に圧縮、水平方向に伸張するように変形する。このとき、のり尻付近の基礎地盤に隆起が見られる場合もある。これに伴い、堤体も堤体下面から水平方向への伸張変形を生じつつ沈下する。
- (c) 堤体の水平方向の伸張変形により、堤体に堤防縦断方向の亀裂が生じる。これが顕著な場合は堤体の縦断亀裂が下方まで深く進展し、堤体がいくつかの土塊に寸断されるとともに、天端付近の土塊の沈下、すなわち天端付近の陥没が生じる場合がある。ま

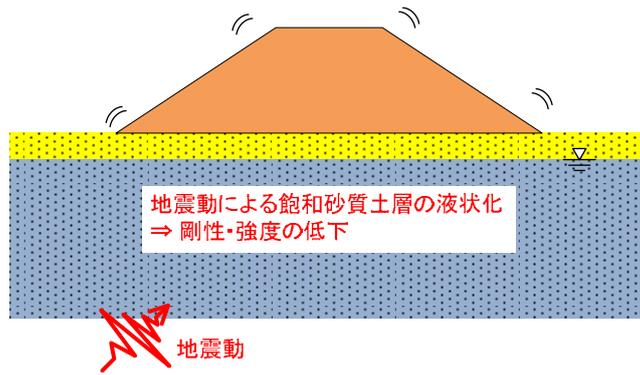
た、のり尻付近の基礎地盤からは液状化した砂質土が噴出し、噴砂として見られる場合がある。

なお、河川流域の基礎地盤は度重なる氾濫履歴等の影響により複雑な土層構成を有する場合が多く、横断面内においても砂質土層の層厚、深度、粒度組成、密度等が大きく変化している場合も多い。したがって、実際に見られる変状の程度は川表側・川裏側で大きく異なる場合もある。また、液状化層に生じる水平方向の伸張変形は、盛土による初期せん断応力に起因して生じるものであるが、初期せん断応力は深さとともに減少していくことから、液状化層が存在する深度に応じ、基礎地盤および堤体の水平方向の伸張変形の程度に違いが生じるものと考えられる。

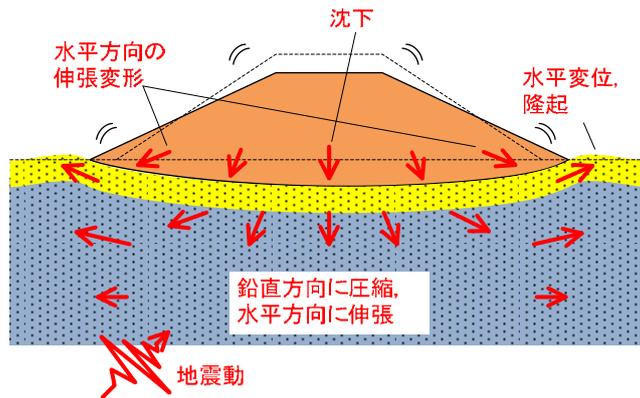
この被災メカニズムは古くから指摘されているものであり、1964年新潟地震における阿賀野川河口付近の堤防¹⁰⁾、1978年宮城県沖地震による名取川種次第一堤防²⁾、1993年北海道南西沖地震による後志利別川兜野築堤⁵⁾⁹⁾、1995年兵庫県南部地震による淀川西島堤防⁹⁾¹¹⁾、2004年新潟県中越地震による信濃川中条地先の堤防¹²⁾などの被害が典型例である。

今回の地震において、このパターンに該当するものとしては、鳴瀬川の砂山地先(6.2.3(1))、旧北上川右岸20.0k付近(6.2.5(1))、江合川の福沼地先(6.2.6(3))、利根川右岸71.0k付近(6.2.11(2))、江戸川左岸58.0k付近(6.2.14(2))などが考えられる。ただし、これらが堤体下部の液状化等との複合的な要因によるものである可能性については現段階では十分な検討がなされているわけではない。今後、地盤調査結果等を踏まえた詳細な検討が必要である。

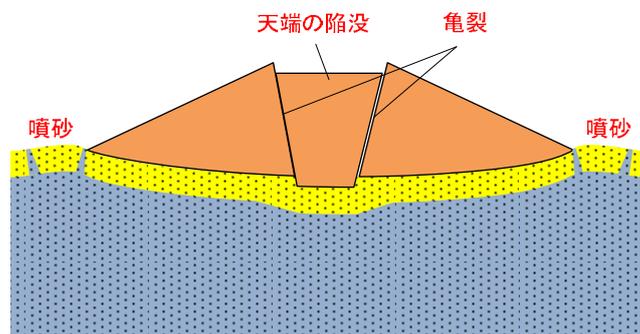
一方、鳴瀬川右岸河口付近の中下堤防(6.2.15(1))では、裏小段にサンドコンパクション工法による対策がなされており、今回の地震において、地震動による被害は認められなかった。その他、関東地方整備局管内においてものり尻付近での液状化対策がなされ、被害が軽減された区間があるため、今後の追加調査・検討により、対策効果の検証を行うことが重要である。



(a) 地震発生～液状化発生



(b) 液状化発生～変形の進展



(c) 地震後の状態

図-6.55 基礎地盤の液状化による被災メカニズム

以上に 2 パターンの大規模被害のメカニズムを示したが、全てがこれらのいずれかあるいは両者に該当するわけではない。例えば、江合川右岸 14.0k 付近(6.2.6(1))では、堤体・基礎地盤のいずれもシルト、粘性土が主体となっており、液状化が被災要因とはなっていない可能性も考えられる。これについても、今後の詳細な被災要因の分析が必要である。

6.3 津波による堤防等の被災

河川研究室は、本省・東北地方整備局の要請により災害復旧等に資する情報を得ることを目的として、北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川を対象に被災状況の概括的把握のための現地踏査を行った。本節は、現地踏査時に得た情報に東北地方整備局、国土地理院等による津波遡上の痕跡や映像など各種データを加えて、水位（川側と堤内側）や流れの向きについて整理するとともに、それらと関連づけて堤防等の被災の形態や程度についてとりまとめたものである。とりまとめにあたっては、河川への津波遡上や被災機構について力学的考察も加え、今後さらに検討を深めていく際の糸口を引き出すことを目的として、現段階で活用できる個々の現地情報を組み合わせて現象の全体像の解釈を試みた。そうした性格の資料であるため、以下の内容は現時点での解釈を示したものであり、今後の検討の進展に応じて適宜確認するとともに、更新の対象となりうる事項を含むことに留意されたい。

なお、津波来襲以前に地震動により既に堤防等に被災・変状が生じていたかは、津波作用による被災について解釈を深めていく上で吟味すべき要素である。この点について本節では、以下に示す理由によって、まずは津波作用に着目して整理している。

- ・ 現地踏査時に観察された土堤本体や基礎地盤の侵食・洗掘・崩壊の形態が、既往研究等の洪水流や越流によるものと酷似しており、また被災形態が痕跡などから推定される津波遡上時の流況とも整合するものであった。こうした観察から得られた知見を整理し、河川における津波の挙動とそれに対する堤防等構造物の応答を考察する上での論点を明確にする。
- ・ 現地踏査範囲において、護岸ブロックやパラペットに地震動によると推察される目地のズレや変形が確認されている¹⁶⁾。また、津波来襲前に撮影された写真から、堤防に隣接するアスファルト舗装に液状化によると推察される変形が確認されている¹⁶⁾。これら構造物の変状は流水に対する構造物の応答に対して一定の影響を与える可能性があり、今後、被災機構について定量的に検討を深めていく際に留意する必要がある。そこで津波作用に対する護岸ブロックやパラペット等の被災の形態や程度といった特徴を整理するにあたっては、上記の耐力への影響を加味しても論理的な不整合を生じない概括的な事項に留める。

本節は上記の考え方に基づく整理であり、地震動の影響については今後情報をさらに広く収集し、精査する必要があることに留意されたい。

6.3.1 河道内および河川近傍の堤内地における津波遡上

(1) 河道内の津波遡上の概況

仙台平野に河口を有する河川周辺への津波第1波目の遡上状況を捉えた映像^{17), 18)}によると、河川周辺の堤内陸域への津波遡上に先行して、河道内を遡上している状況が見られた。また、堤内側からの越水が生じた区間においても堤防の尻際の高水敷の洗掘（落堀）の形成が不明瞭であり、また天端のり肩部周辺ののり面侵食が顕著であったことなどは、河道内の水位が堤内側に先行して上昇していたことを示唆するものと考えられる（被災状況の詳細については6.3.2参照）。

新北上川に設置された2箇所の水位観測所で観測された津波遡上時の水位経時変化を

図-6.56に示す。なお、2観測所間において痕跡水位は堤防高を下回っている（図-6.57(a)参照）。下流側の福地観測所では1波目の津波遡上時に2分程度で約3mといった急激な水位上昇が生じている。これは河川に沿って設置されたCCTVカメラで津波遡上を捉えた動画で見られた段波状の津波遡上に対応する変動を捉えたものと考えられる。

また、津波が上流へ伝播する波速は、2観測所での1波目ピーク水位間の時間差と観測所間の縦断距離（6.37km）の商として算定すると、約8m/sとなった。また、上流への伝播に伴い波高が低減しているが、最大水位の発生時刻に着目すると河口側の福地観測所のほうがその上流の飯野川上流観測所より遅くなっていることから分かるように、その低減の仕方は複雑である。

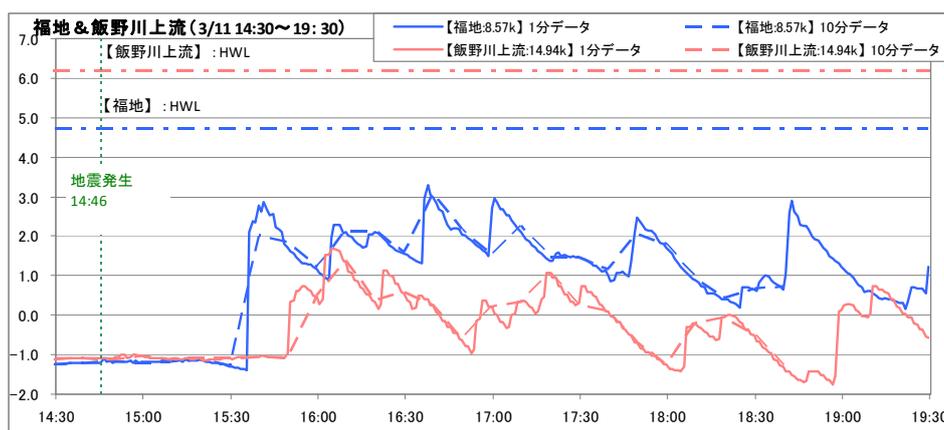


図-6.56 新北上川における津波遡上時の水位経時変化の観測結果
（東北地方整備局による観測データ）

(2) 河道内および堤内の津波痕跡水位調査結果

東北地方整備局が実施した阿武隈川、名取川、鳴瀬川および新北上川を対象とした河川周辺の津波痕跡調査の速報データを用いて、河川研究室において整理した結果を図-6.57に示す。痕跡調査では、堤防のり面をはじめ、橋梁、水門、堤内地の建設物や山裾部などで確認された痕跡の標高を測定している。今次の津波は河川堤防高を超える最大水位に達している区間があり、その区間で得られる痕跡は、上記した河川堤防より高い構造物等に限られるため、データ数が少ない。また、そうした構造物であっても水没したと推察されるもの、また山裾に津波が打ち上げられた高さ（遡上高）に相当するデータなどが速報データには含まれている。今後データを精査するとともに、津波再現計算などを併用して河川に沿った川側・堤内側の最大水位の分布を明らかにしていく必要があるが、今回図-6.57の作成にあたっては、その代わりとして現地踏査時の観察結果を踏まえて最大水位分布をごく大まかに推定した結果を「大まかな水位の変化傾向」と注書きを付した曲線として表示することとした。

堤防天端高を基準とした堤内側・川側の水位の高低の組み合わせから、河川への津波遡上状況を河口から上流に向かって図-6.58に示すように大別することができる。最も河口側では堤内・川側とも天端を超える最高水位に達する「堤防水没区間」、その上流では堤内側水位が天端高以下で川側から越水する「堤防越水区間」となる。なお、堤防水没区間であっても、最大水位に達するまでの間（例えば、(1)で述べた河道内を先行する津波

遡上が生じている間) やそれ以降において、川側または堤内側からの越水が卓越する時間帯があると推察される。これら区間より上流には、堤内・川側とも堤防天端高以下で遡上する「堤防高以下遡上区間」となる。この区間の一部では、川側水位が堤内地盤高および堤内側水位より高くなっており、すなわち河川堤防が津波遡上を河道内に留めた状況となっている。

なお、阿武隈川の亘理大橋地点では、左岸に比べて右岸側の痕跡水位が非常に高くなっている。このデータは亘理大橋の高欄に引っかかった植物を津波遡上による痕跡と判断して得たものであり、津波到達を示す痕跡としての判定の信頼性は高いと考えている。この地点で河道は下流に向かって左に湾曲しており、つまり津波遡上に対して外岸側にあたるため水位上昇が生じたと考えられる。

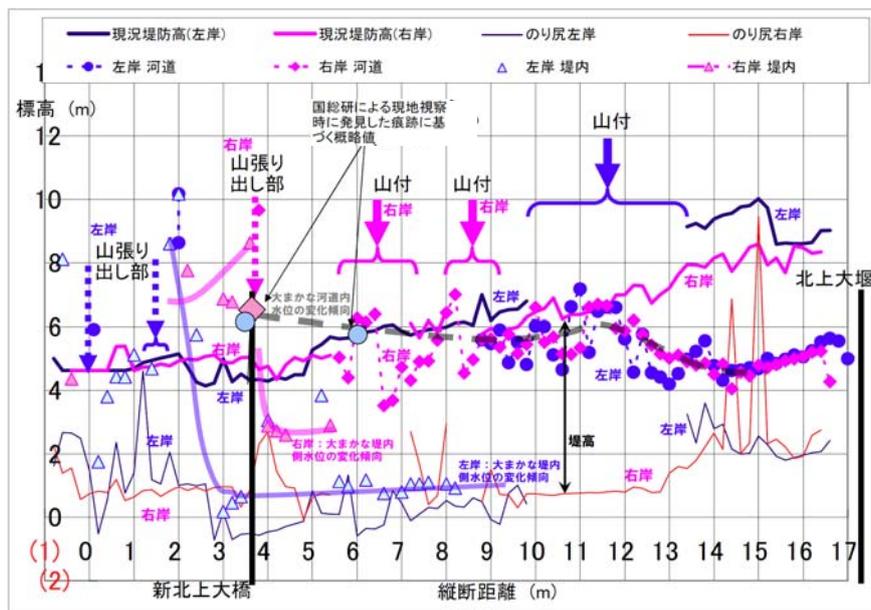


図-6.57(a) 新北上川における痕跡水位調査結果 (東北地方整備局よりデータ提供)

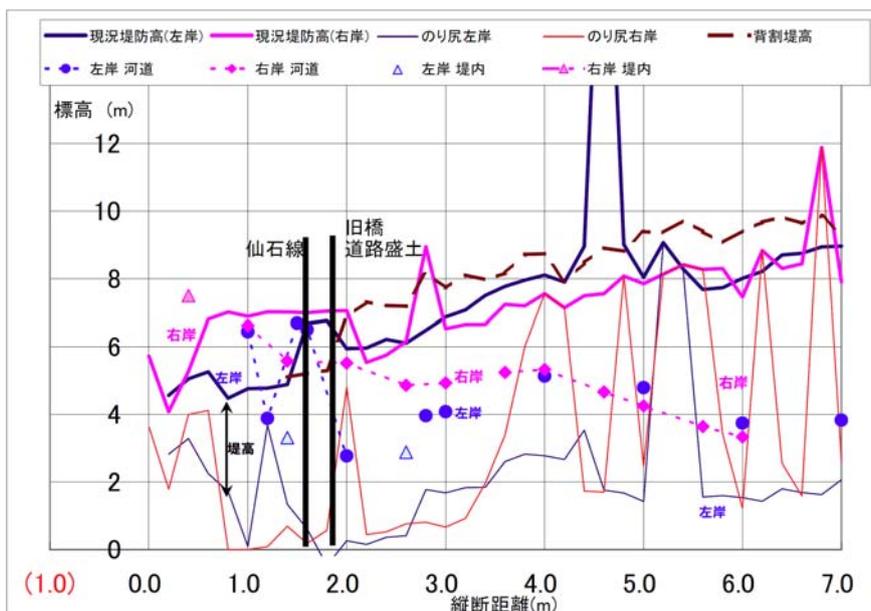


図-6.57(b) 鳴瀬川における痕跡水位調査結果 (東北地方整備局よりデータ提供)

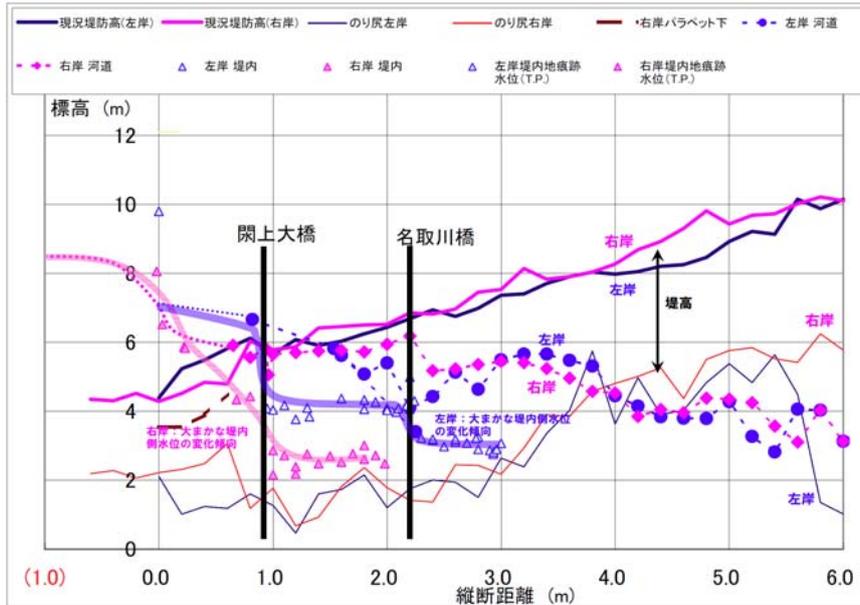


図-6.57(c) 名取川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

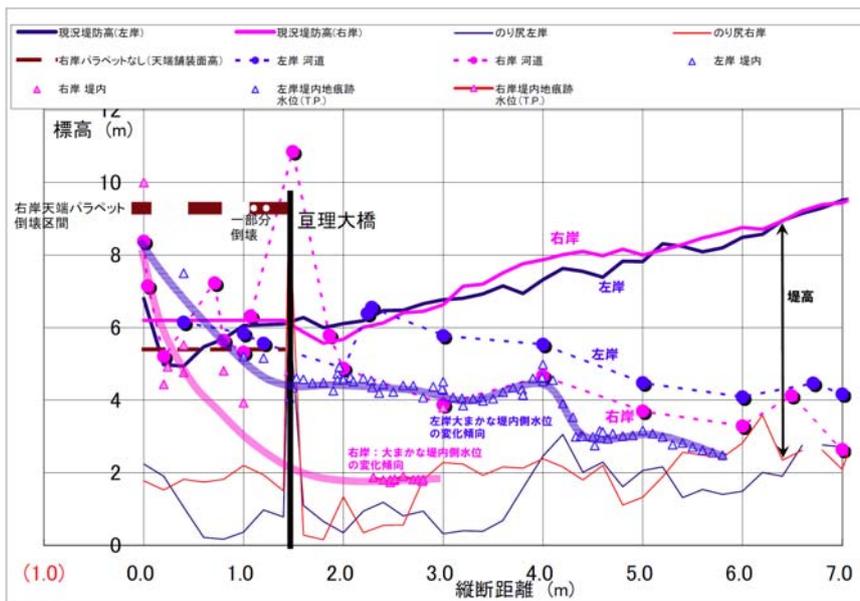


図-6.57(d) 阿武隈川における痕跡水位調査結果（東北地方整備局よりデータ提供）

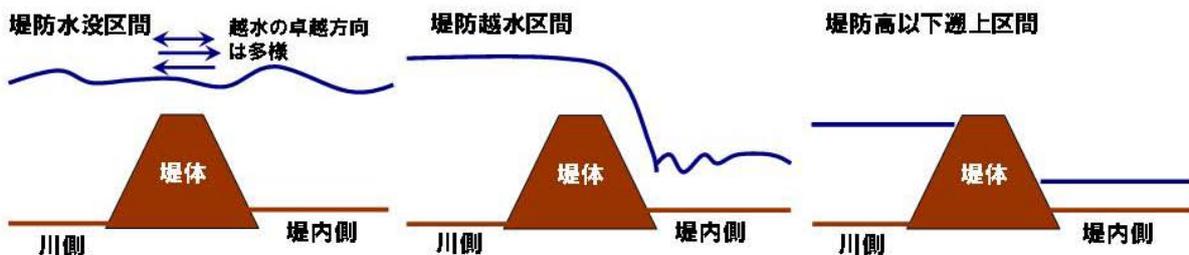


図-6.58 河川への津波遡上状況の3区分

(3) 堤防法線形状と盛土・山脚など高地部が津波遡上に与える影響

新北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川の下流部の空中写真（国土地理院⁴⁾から引用）に津波遡上の流向（写真上の青矢印）と遡上状況区分（図-6.58参照）を併記したものを写真-6.108に示す。なお津波遡上の流向は、空中写真から判読した電信柱の倒伏方向または現地踏査で確認した植生倒伏や天端舗装の剥離・流送方向等から推定した。なお、堤防上の矢印は川側または堤内側への越水の卓越方向を表しており、厳密な意味での流向では必ずしもないことに留意されたい。

これら写真と図-6.57に示した痕跡水位から、津波遡上状況について以下のように整理できる。

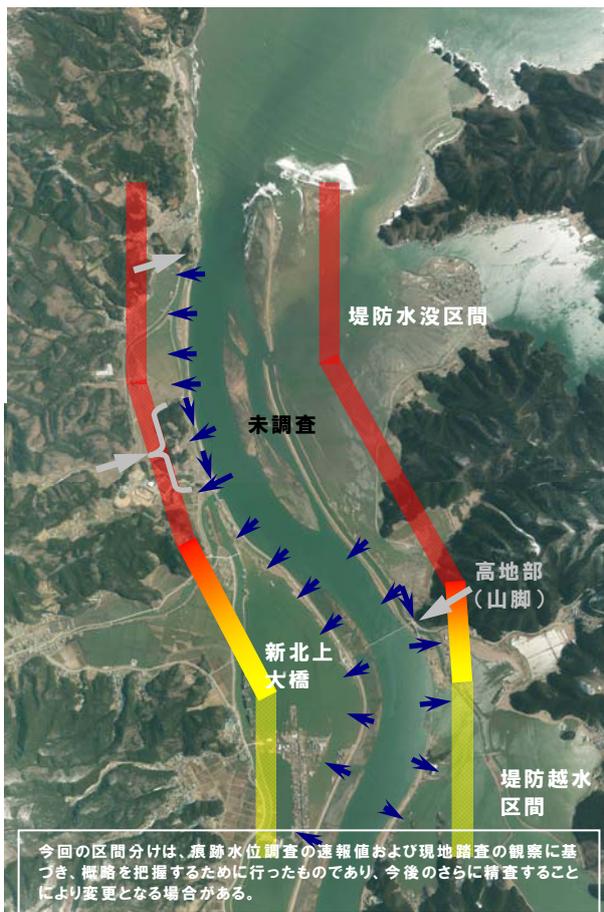


写真-6.108(a) 新北上川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

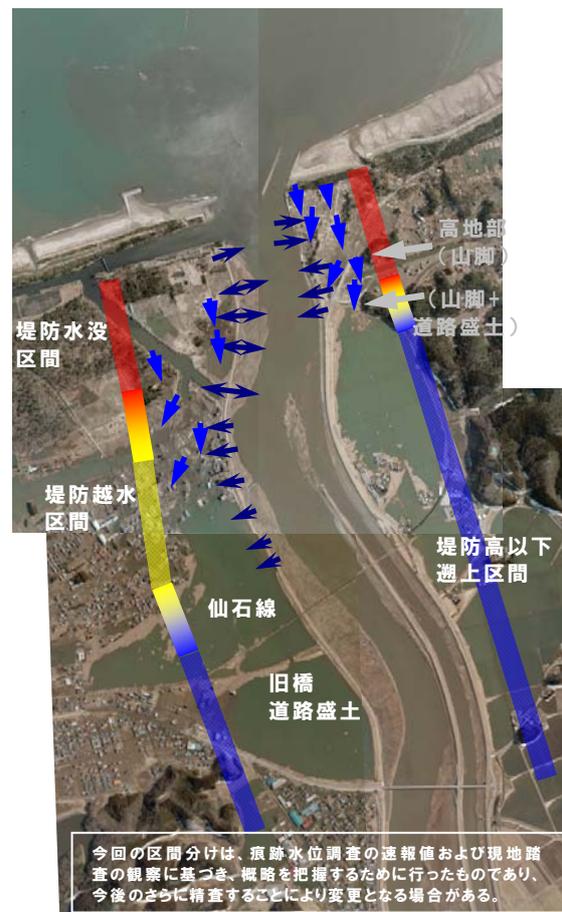


写真-6.108(b) 鳴瀬川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

a) 汀線に対してほぼ垂直な向きに概ね直線的に堤防が延伸する場合

これに該当する代表例として、名取川右岸および鳴瀬川左岸が挙げられる。堤防水没区間では、河川堤防を挟んで堤内・川側の両方向へ向かう痕跡が見られた。鳴瀬川左岸では、一連区間で天端舗装が川側に流送されており（6.3.2(2)参照）、一時的にある区間に渡って同一方向に堤防を越える流れが生じた可能性が考えられる。

この区間よりさらに上流に向かうと川側・堤内側とも徐々に最大水位が低下するが、

その度合いが川側より堤内側のほうが大きいいため、川側からの越水を伴う「堤防越水区間」、さらに上流には「堤防高以下遡上区間」となる。

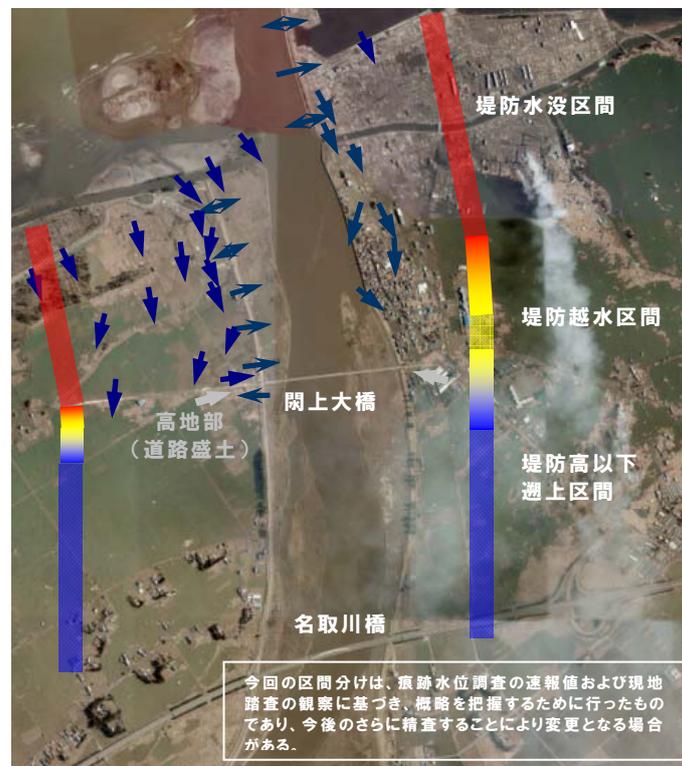


写真-6.108 (c) 名取川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

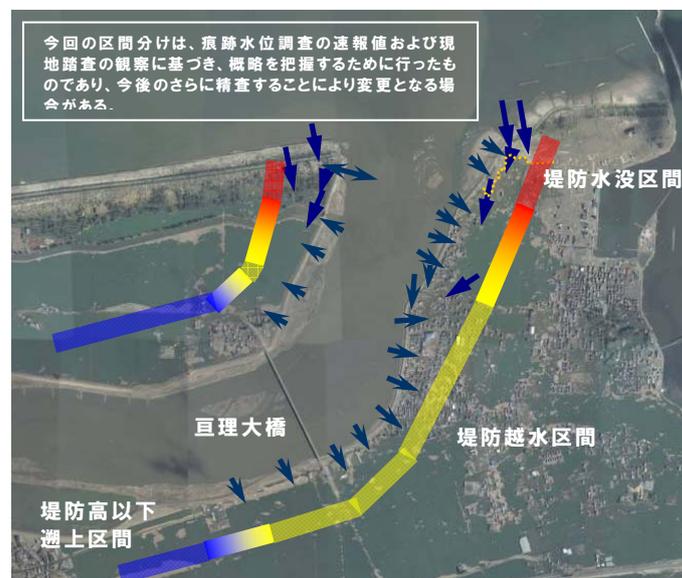


写真-6.108 (d) 阿武隈川の津波遡上状況（空中写真は国土地理院¹⁹⁾から引用）

b) 盛土・山脚など高地部が a) の河川堤防に隣接する場合

これに該当する代表例として、名取川左岸および新北上川左右岸が挙げられる。名取川の場合には関上大橋の道路盛土、新北上川の場合には山脚部が堤防近傍まで接近してい

る箇所（左岸では 1.2～1.8km、右岸では 3.8km 地点：いずれとも山脚が堤防には接続せず、間に水路が通っている）である（写真-6.108(a), (c)に灰色矢印で示した）。

高地部において堤内側を遡上してきた津波がせき上げられて水位を増大させ、これが河川堤防を越えて川側へ越水したと考えられる。したがって、高地部より下流では「堤防水没区間」となるが、a)との差違は高地部の下流側近傍で川側へ向かう越水が卓越することである。

新北上川の場合、山脚部より上流では堤内側へ越水する「堤防越水区間」となった。右岸側ではこの区間内において約 400m におよぶ破堤が生じた。なお、山脚部より上流において堤防に隣接する水路に沿って遡上してきた津波が氾濫したと推察される様子が撮影されている¹⁶⁾。

名取川の場合、道路盛土より上流では堤内側の津波遡上水位が大きく低下している。これは、堤防近傍では津波が道路盛土を越水せず、堤防から離れるにともなって徐々に低くなる道路盛土を回り込んで上流に津波が遡上していった状況¹⁷⁾から、回り込みに伴う津波遡上距離の増大や流れの拡散の影響等によって波高が低減したためと考えられる。

c) 川側のり面が河口に面するように堤防が汀線に対して斜め方向に延伸する場合

これに該当する代表例として、阿武隈川右岸の河口から約 1km の範囲（湾曲部より下流の範囲）が挙げられる。この範囲では「堤防水没区間」においても、6.3.2(4)に後述するように川側から越水によるり面崩壊とのり尻での落堀形成が生じていた。また、堤防天端に設置されたパラペット上の金属製手すりには、川側からの越水を示唆する植生の集積や流送物の衝突によると推察される変形が見られた。さらに、一部パラペットが倒壊し、堤内側に流送されていた。以上の状況から、川側のり面が河口に面するように堤防法線が汀線に対して斜め方向に延伸する区間では、川側からの越水が卓越する場合があると推察される。

d) 津波遡上に対して外岸側となる堤防湾曲区間

これに該当する代表例として、阿武隈川右岸の湾曲部が挙げられる。(2)に示したように、湾曲部に位置する亘理大橋の痕跡調査から外岸側において水位の増大を示唆する結果が得られている。後藤ほか²⁰⁾による湾曲部を有する河道内の津波遡上に関する数値計算結果においても外岸部で水位増大が生じており、亘理大橋の痕跡はこうした津波波高の変化を捉えたものと推察される。

阿武隈川の湾曲部から直線河道に移行する外岸側の箇所において、津波遡上により低水護岸が流失している。新北上川においても、河道形状がほぼ同様な箇所（4.6～4.8km 地点右岸）でやはり低水護岸の流失が生じている（写真-6.109(a)参照）。なお、これら被災箇所より下流では流失には至っていない。今後、護岸構造など耐力の観点を加味して被災機構を分析する必要があるが、上記した類似性から護岸流失は湾曲外岸部における波高増加など津波の挙動と何らかの関連性があると推察される。

6.3.2 堤防等河川管理施設の被災・変状

新北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川の堤防等河川管理施設の被災・変状等について、現地踏査時に確認した事項などを付した写真を以下に示す。写真-6.108 に現地踏査を実施した範囲をL-*, R-*として示すとともに、被災・変状の状況について表-6.4 に示すように定性的に分類した結果を併記した。なお、被災・変状等の写真については各範囲における代表的事例と考えられる地点のものを掲載している。

表-6.4 堤防・護岸の被災・変状の分類

	のり面の状況	表のり 津波遡上流れによる侵食が主	裏のり 越水流れによる侵食が主
	植生のり面	草本植物が流れの作用で倒伏しているが、剥離はほとんど見られない	草本植物が流れの作用で倒伏しているが、剥離はほとんど見られない
	植生のり面	草本植物が部分的に剥離する。剥離した部分は溝状に深く浸食される場合がある。	ガリ状の部分的なのり面植生の剥離・堤体の侵食が生じた状態。落堀の形成はない、または軽微。
	植生のり面	草本植物が全面的に剥がれて裸地化するのに伴い、のり面に侵食による凹部が見られる。	全面的にのり面が侵食・崩壊し、鉛直に切り立った状態。落堀の形成を伴う場合がある。
	植生のり面	草本植物が全面的に剥がれて裸地化し、堤体土が侵食され元の平坦なのり面形状を留めない。	のり面が流失し、さらに天端まで侵食・崩壊が及んだ状態。落堀の形成を伴う場合がある。
	コンクリート護岸 特殊堤	護岸に若干の変状が見られるが、機能上大きな低下はない程度のもの	コンクリート擁壁により全面的に覆われた状態を維持。機能上大きな低下はないと判断される程度のもの。
	コンクリート護岸 特殊堤	のり覆工が捲れ上がるなど、流失した状況	コンクリート擁壁等が流失した状況
	のり尻舗装	該当なし	堤防のり尻に隣接してアスファルト等の舗装されている区間

(1) 新北上川

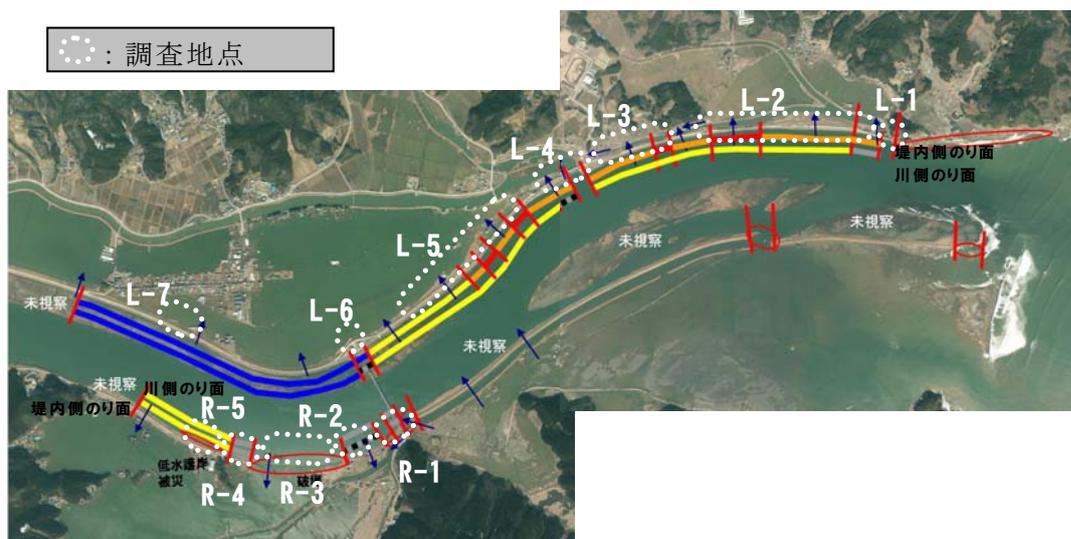


写真-6.109 新北上川における現地踏査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆堤防高を大きく上回る水位痕跡（赤丸部）



◆左写真の上流に位置する水門の被災

② L-2 地点



◆堤内側への越水によると考えられるのり面の侵食と落堀の形成



◆川側のり面：植生が剥離するとともに、筋状に堤体が侵食されていた（上流を望む）

③ L-3 地点



◆堤内側のり面の侵食：のり尻部には山脚・堤防間を流下する水路あり



◆川側のり面：筋状の侵食域（下流を望む）

④ L-4 地点



◆堤防天端際に設置された施設の損壊



◆水門脇護岸ブロックの上流へのめくり上がり



◆堤内側への越流によると考えられるのり面の侵食と落堀の形成



◆川側のり面の侵食：覆土下から護岸ブロックが露出

⑤ L-5 地点



◆堤内側への越流による侵食：天端が一部流失している



◆川側のり面：天端～のり肩部が侵食を受けている

⑥ L-6 地点



◆堤防天端際に設置された施設：津波遡上により側壁が損壊（地表から約 2m の高さ）



◆左写真の道路に続く新北上大橋の橋桁の流失。高欄に流送物が集積している。

⑦ L-7 地点



◆天端の水位痕跡：天端上 20cm 程度



◆堤内側のり面：越水によって植生がのり尻に向かって倒れ、溝状に堤体が侵食されていた

⑧ R-1 地点



◆L-6 地点の対岸：流下物集積から天端上 1.6m 程度まで冠水したと推定される



◆堤脚と本川堤防間を流下する水路：橋梁の前あたりで本川堤防が破堤している

⑨ R-2 地点



◆高水護岸は枠内の袋詰工が一部流失したが、コンクリート部には目立った損壊なし



◆堤内側のり面の侵食状況：下流側（写真奥）では落堀が形成されていた



◆津波遡上方向（写真左→右）に見ると、堤内側擁壁際の堤体侵食が徐々に大きくなり擁壁が転倒し、さらにその先では破堤している

⑩ R-3 地点



◆堤防の川側のり先部の道路：道路左端のコンクリートは高水護岸の基礎工。基礎工は破堤区間全長に渡って存置していた。



◆津波遡上に対して湾曲部外岸となる区間：場所によっては捨石工の打ち上げと思われる変状が見られた。

⑪ R-4 地点



◆破堤区間の上流端：護岸背後の堤体が侵食され、支えを失った護岸が折れたように見える



◆R-2 地点と同様に、擁壁近傍の天端が侵食されていた

⑫ R-5 地点



◆川側のり面：山付部では表土が流失し、岩盤面が露出



◆津波遡上に対して山付部の背後に位置する地域：堤内地の痕跡水位は堤防天端より低い。のり面には越水による損傷が認められた

(2) 鳴瀬川

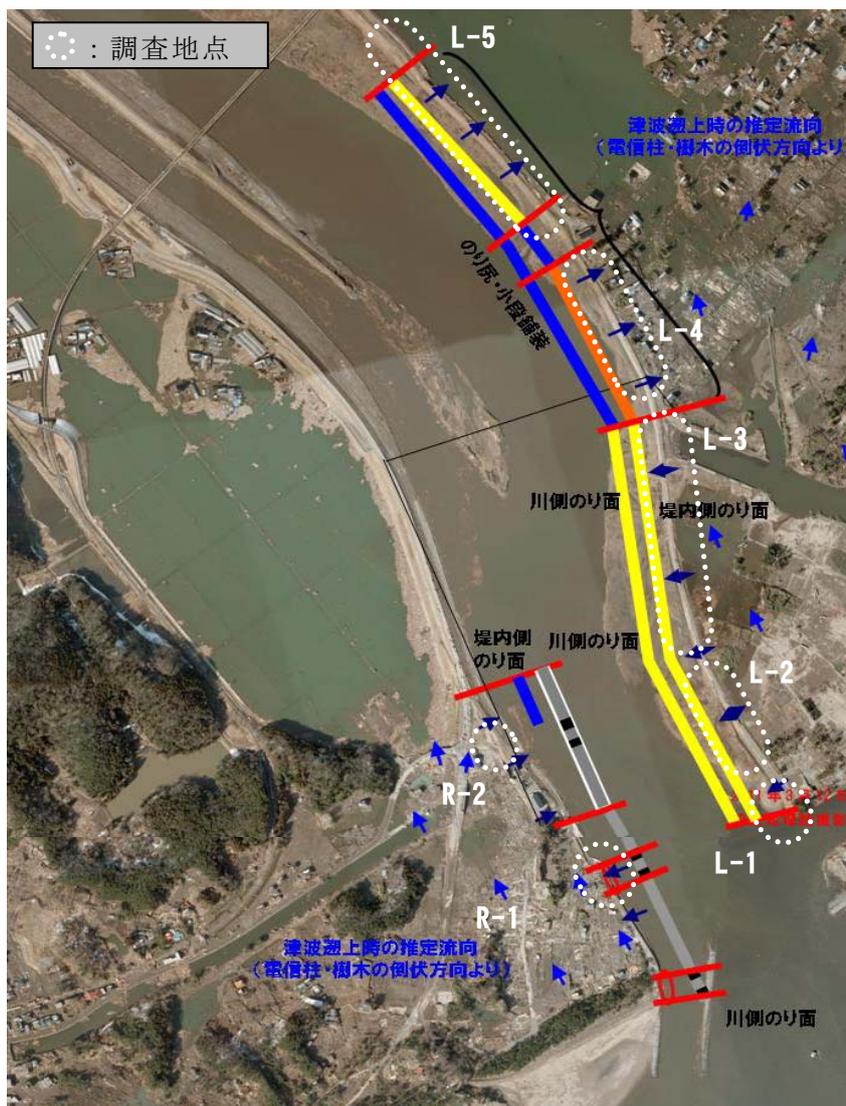


写真-6.110 鳴瀬川における現地調査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆堤防天端際に設置された施設：屋根の損壊から水位痕跡を把握(天端から約2mの高さ)

② L-2 地点



◆川側のり面：のり肩部の植生が捲れ上がっていた。

② L-2 地点



◆堤内側ののり肩部の損傷。川側・堤内側とも天端付近に損傷が集中しているのが特徴的

③ L-3 地点



◆川側ののり肩部の越水によると推定される侵食

③ L-3 地点



◆剥離したアスファルト。川側に断片が流送されていた。



◆堤内側のり面には、明確な侵食による損傷や越流の痕跡がほとんど見られなかった

④ L-4地点

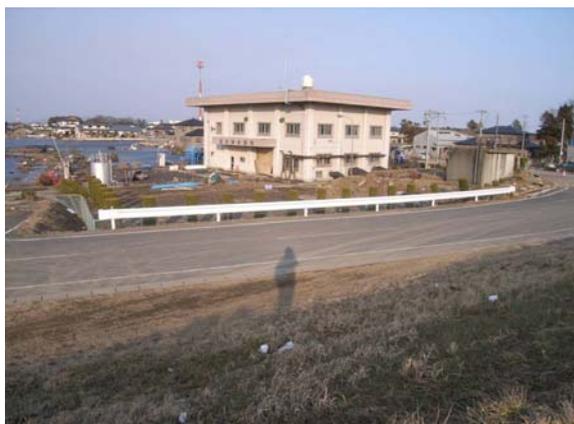


◆堤内側のり面の侵食：葉茎ののり尻に向かう倒伏と塀の倒伏状況は、川側から堤内側への越流の発生を示唆する



◆川側のり面に損傷はほとんど見られなかった

⑤ L-5地点



◆排水機場壁面の痕跡水位は堤防天端より低い



◆堤内側のり面：川側からの越水を示唆する痕跡



◆堤内側小段上の舗装の損壊とのり尻の侵食状況



◆川側のり面の2筋の水位痕跡：複数回の津波遡上が生じたことを示唆

⑥ R-1地点



◆特殊堤の背後の侵食：一部倒壊していた

⑦ R-2地点



◆覆土下の高水護岸が露出：天端側のブロックがのり尻側に移動（堤内側からの越水による）

(3) 名取川

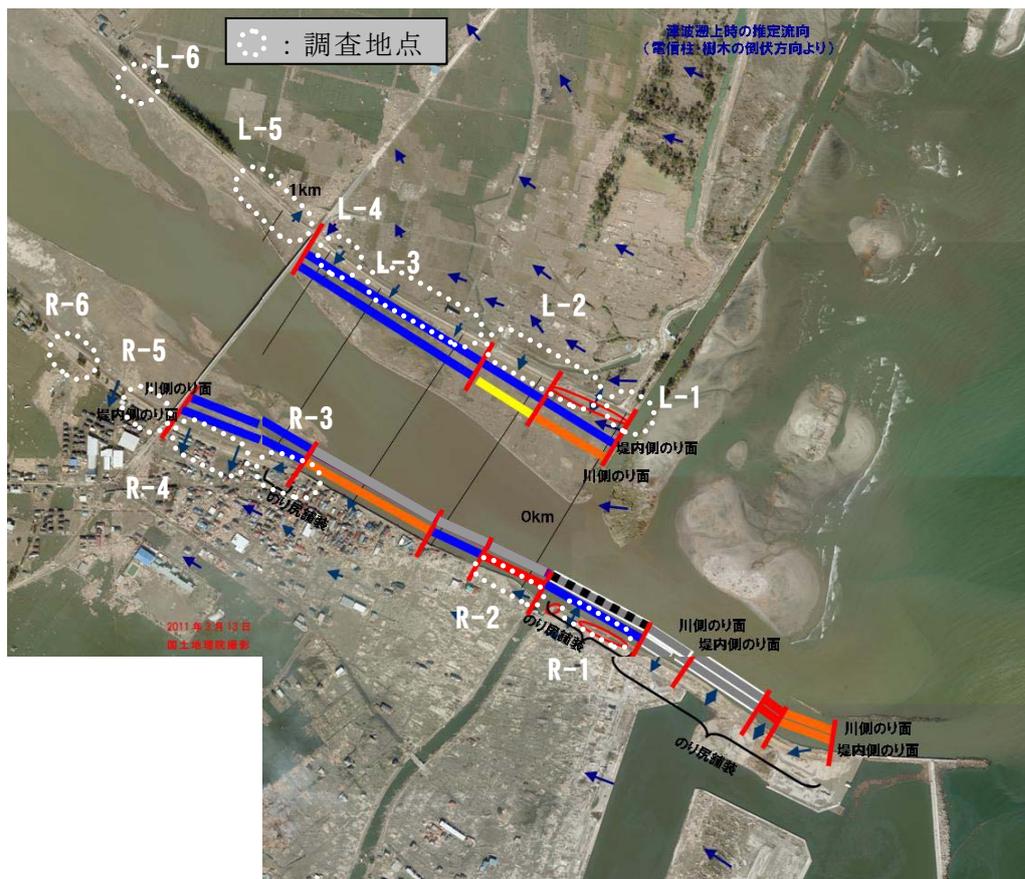


写真-6. 111 名取川における現地調査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆河口部：堤防先端部分の侵食状況

② L-2 地点



◆天端舗装の剥離・流送：その下の堤体土の侵食は軽微

② L-2 地点



◆川側のり面では植生が広い範囲で剥離



◆対照的に堤内側のり面では植生に目立った損傷なし



◆川側のり面：のり尻部にのみ植生が残存



◆天端のアスファルト舗装が剥離し、川側（写真左側）へ流送されていた。

③ L-3 地点



◆川側のり面：植生がのり尻方向に倒伏しており堤内側からの越水を示唆。のり肩部のガリ状侵食は流下物の擦れによる損傷の可能性あり



◆坂路上流のり面では、他の箇所比べて損傷が著しかった

③ L-3 地点（坂路より上流）



◆川側のり面



◆堤内側のり面

◆両のり面とも坂路より上流では特段の損傷は認められなかった

④ L-4 地点



◆堤内側の津波遡上が道路盛土に阻まれて、川側に越水。その際に流送物が堤防に乗り上げる。

⑤ L-5 地点



◆道路盛土上流では、川側から堤内側へ越流（写真左のガードレール上の痕跡から）

⑤ L-5 地点



◆川側のり面：特段の損傷は認められない。



◆堤内側のり面：天端すぐ下のり面には越水の痕跡あり。堤内側の痕跡水位は小段高さ程度

⑥ L-6 地点



◆川側のり面：特段の損傷は認められない。痕跡も不明確



◆堤内側のり面：堤内側の痕跡水位は小段高さ程度

⑦ R-1 地点



◆川側のり面：護岸ブロックが上流（写真手前側）に向かって捲れ上がる（4/24 現地視察）



◆堤内側のり面：特段の損傷は認められなかった（4/24 現地視察）

⑧ R-2 地点



◆特殊堤の背後の地盤が洗掘されていた（4/24 現地視察）



◆左写真の下流側：洗掘は広い範囲におよぶ（4/24 現地視察）

⑨ R-3 地点



◆堤内地の地盤高が左岸に比べて高い→津波による家屋流失を免れた一つの要因と考えられる：川側からの越水が顕著

◆川側の状況：遠目からでは特段の損壊は見られなかった



◆堤内側のり面：越水による植生の倒伏：家屋にも越水によると思われる損壊が見られた

◆川側のり面：部分的に植生が剥離：根茎が露出する

⑩ R-4 地点



◆堤内側のり面：植生の倒伏は明瞭でない（越水があったとしても、水深はごく小さいと推定される）

◆堤内側のり面の痕跡水位：川側に比べて水位が低いと想定される

⑩ R-4 地点



◆護岸天端部での植生のめくれ上がり：ほぼ堤防満杯で遡上した津波が橋桁でせき上げられて越水したと推定される。

⑪ R-5 地点



◆川側のり面：小段上に水位痕跡

⑪ R-5 地点



◆堤内側では冠水の痕跡なし（地盤高が高いためと推定される）

⑫ R-6 地点



◆川側ではのり尻近傍に水位痕跡あり

⑫ R-6 地点



◆堤内側も同様にのり尻近傍に水位痕跡あり

(4) 阿武隈川

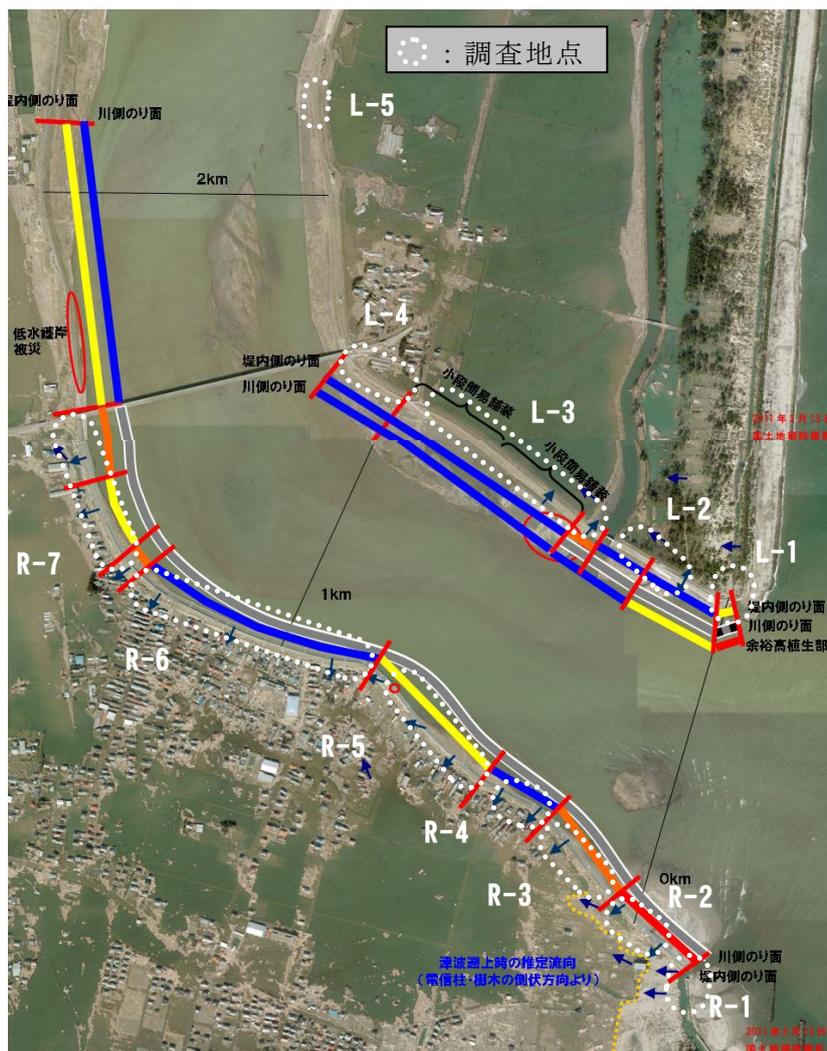


写真-6.112 阿武隈川における現地調査地点と被災状況
(空中写真は国土地理院¹⁹⁾より引用)

① L-1 地点



◆河川堤防に接続する海岸堤防の被災：裏のり側から内部の土砂が抜け出してコンクリート枠がつぶれるように倒壊



◆河川堤防：堤内側からの越水により損壊：根固ブロックも一部流失

② L-2 地点



◆川側のり面

◆堤内側のり面

◆両のり面とも越水によると考えられる侵食や植生の倒伏が見られた



◆上写真のさらに上流：のり肩部の侵食から天端は冠水していたと推察される

◆堤内側のり肩で路面上の植生の捲れ

③ L-3 地点



◆水門脇の護岸の陥没：地震動に起因するものと推察される

◆川側のり面：特段の損傷は見られなかった

③ L-3 地点



◆堤内側のり面には越水による植生の倒伏・侵食が見られた。小段上の舗装が剥がれ、のり尻に流送・堆積していた。

④ L-4 地点



◆工事看板の倒伏や杭への流送物の集積状況から川側（写真右）から越水と推定（天端から20cm程度の水位）

④ L-4 地点



◆堤内側のり面には越水による侵食・植生の倒伏が見られた。痕跡水位は小段上程度。

⑤ L-5 地点



◆川側のり面：痕跡水位は天端より低い（越水なし）

⑤ L-5 地点



◆堤内側のり面：痕跡水位は小段より低い（川側のほうが高い）

⑥ R-1 地点



◆河川堤防と海岸堤防が接合する隅角部での破堤

⑦ R-2 地点



◆越水による土堤部の侵食状況：のり肩のパラペットが流失。天端まで侵食が及ぶ

⑦ R-2 地点



◆樋門足場に水位痕跡（天端から 1.5m 程度）

⑧ R-3 地点



◆天端が完全に流失：深い落堀が形成



◆パラペットは流失せず、手すりに痕跡が見られる：越水によるのり面侵食と落堀形成

⑨ R-4 地点



◆パラペットの手すりに痕跡ほとんどなし：のり面の侵食が軽微、落堀は見られない（R-2→R-3→R-4と越流による堤防の侵食の程度が徐々に小さくなる傾向が見られる）

⑩ R-5 地点



◆一連区間でパラペットが流失し、天端アスファルトも剥離・流失



◆越流によるのり面侵食と家屋損壊

⑪ R-6 地点



◆のり面の侵食は比較的軽微

⑫ R-7 地点



◆一連区間でパラペットが流失し、のり面の侵食も発生。

⑬ R-7 地点



◆のり面の侵食状況：R-6に比較して侵食が進行している。のり尻部では舗装によって洗掘が抑制されたと考えられる



◆河口を望む。津波の作用によると考えられるのり尻捨石の打ち上げ。

6.3.3 河川堤防・護岸の被災の特徴

本項では、河川堤防と護岸を対象として、津波遡上時の水位や流向と被災の形態や程度との関連性の観点から、新北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川に共通していると考えられる特徴、および個々の事象を組み合わせることで全体を俯瞰することで引き出せる現時点での現象の解釈について整理して示す。

写真-6.109～写真-6.112 に示した各河川の被災状況（定義については表-6.4 参照）を痕跡水位と併せて整理した結果を図-6.59 に示す。以下の議論では、本図とともに 6.3.2 に示した個別箇所での被災状況を併せて参照されたい。なお、以下の文中に示す「河川名 [L-*又は R-*]」は 6.3.2 に示した各河川の調査地点と対応している。

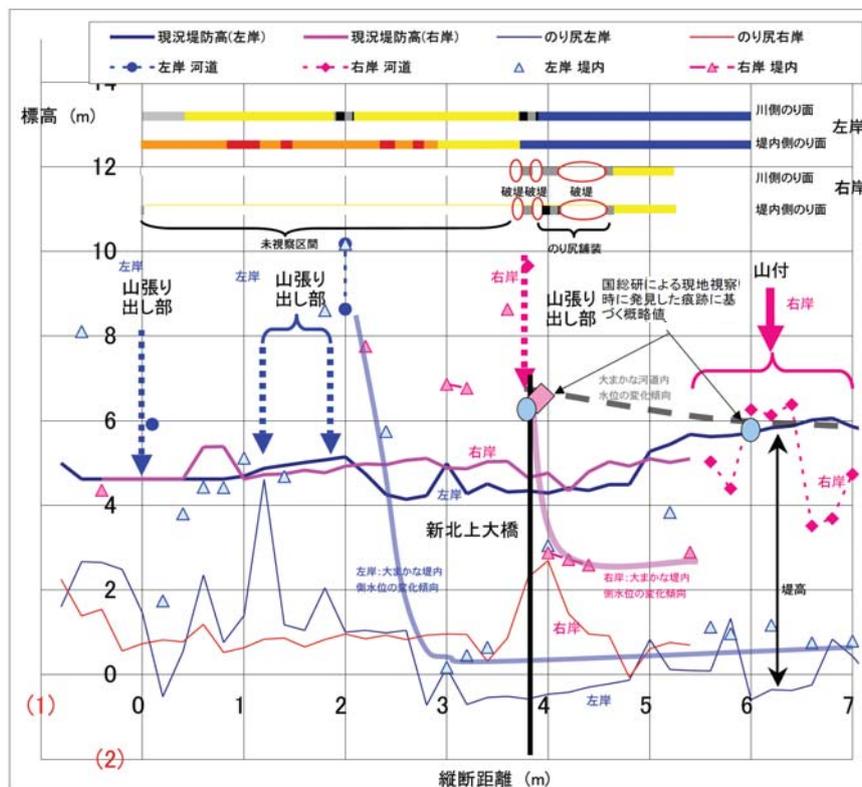


図-6.59(a) 新北上川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

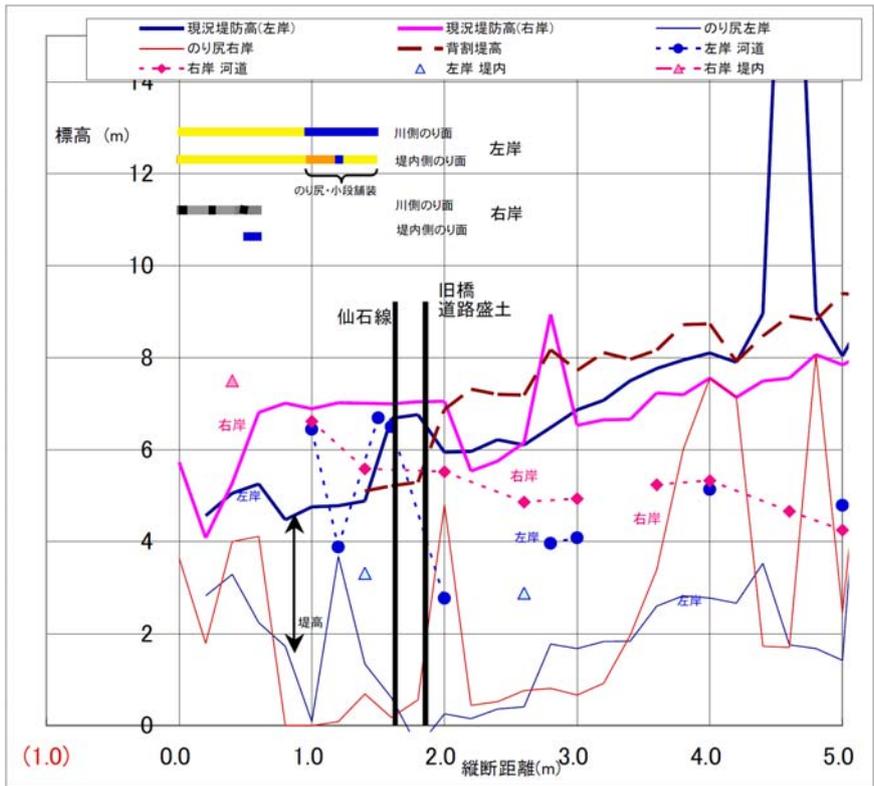


図-6.59(b) 鳴瀬川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

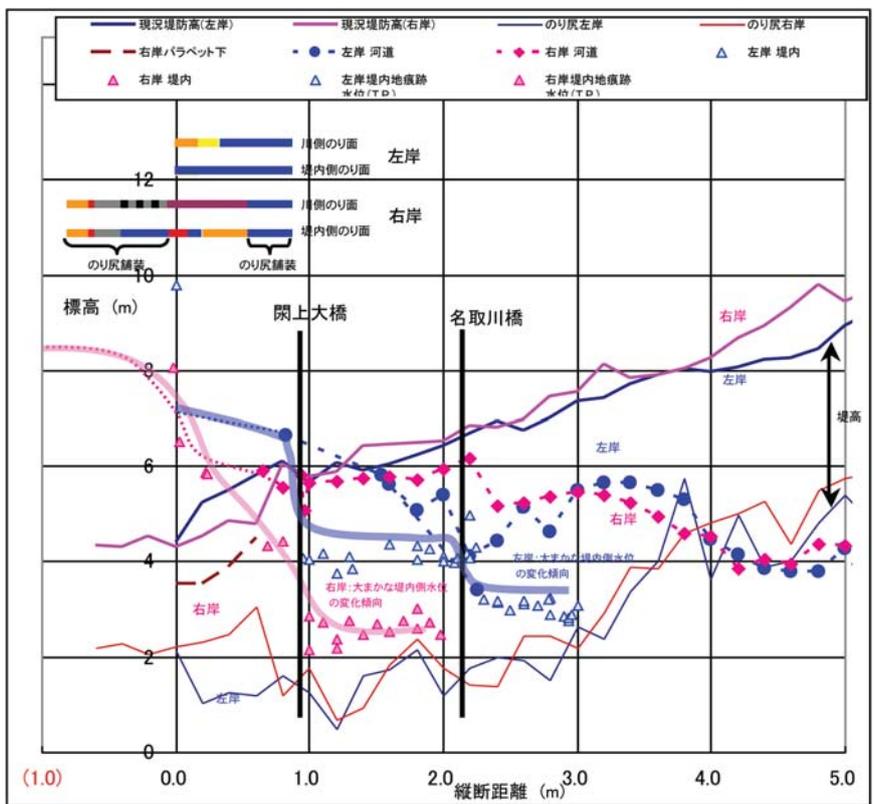


図-6.59(c) 名取川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

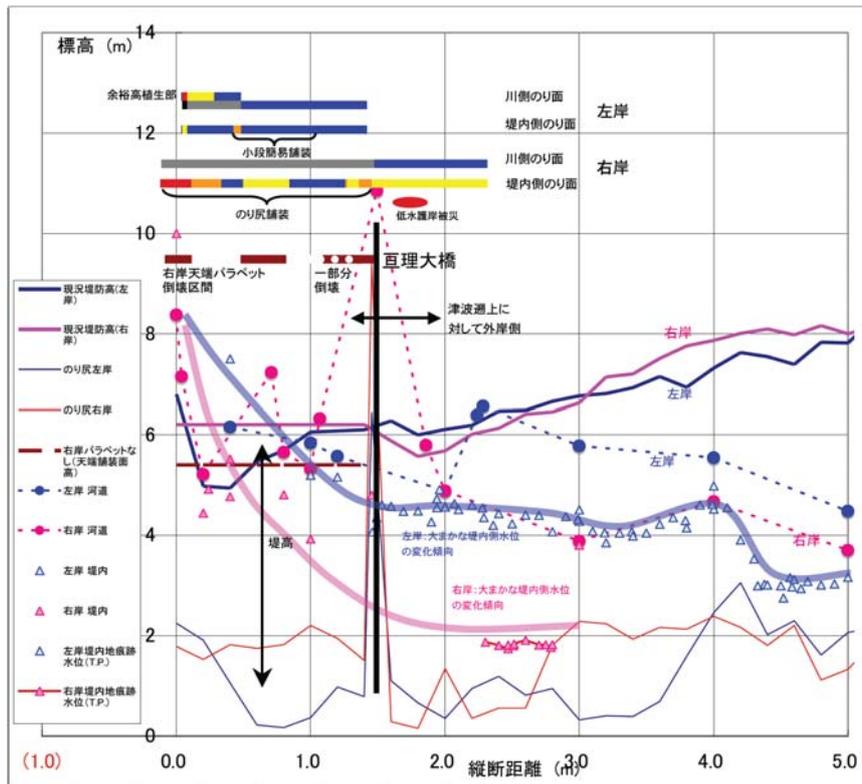


図-6.59(d) 阿武隈川における痕跡水位と被災状況の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

(1) 破堤地点

破堤に至った地点は、「堤防水没区間」または「堤防越水区間」に分類される津波遡上が生じた区間であり、かつ①河口部の海岸堤防と接続する隅角部とその周辺、②特殊堤区間、および③河道が湾曲しているなどのため河口から遡上してくる津波に対して川側のり面が向かい合う形になる区間に位置していた。③に分類される阿武隈川[R-2]は、①に該当する破堤区間[R-1]に隣接するとともに、破堤には至らなかったものの、越水による侵食で堤内側のり面が堤防天端を切り欠く程度まで進展した区間である。こうした状況から、③については越水による侵食を糸口として破堤機構について検討することが考えられる。これについては後述(2)を参照されたい。①、②については、被災状況の観察のみからでは破堤機構の推察が困難であった。今後、被災前の堤防構造や河口部での津波の挙動などについて精査し、検討を進める必要がある。

(2) 土堤部の越水による被災

堤内側への越水流れによると推定される堤体の侵食や基礎地盤の洗掘(落堀)は、上述したように破堤地点近傍でも確認されており、例えば新北上川[L-2, L-4, L-5]や阿武隈川[R-2, R-3]のように堤体断面を大きく減じるものがあつたことから、破堤に次いで程度の大きな被災の一形態と考えられる。これら堤防天端を切り欠く程度(表-6.4の凡例で赤およびオレンジ区分)の侵食が生じた地点では、痕跡水位から堤防天端で最大1m程度またはそれ以上の冠水が生じたと推察される。図-6.56に示した津波遡上時の水位変動に見られる急激な水位上昇、および河道内の津波遡上が堤内に先行して生じることを併せて考

えると、上記のような冠水深に近い越流水深での堤防越水が生じていたと考えて良いであろう。このような強い越流を受けながら破堤に至らなかった要因については、痕跡水位や越水時を捉えた写真などに基づいて推定される津波越水の状況から、以下のように推察される。

①「堤防水没区間」に位置する新北上川[L-2, L-4]、阿武隈川[R-2]

一つの要因として、**図-6.60** に模式的に示すような堤内側の水位の急上昇が考えられる。新北上川の場合、氾濫原は山間の平地であり、そのため堤防から山地斜面までの距離、すなわち平地の幅が狭いこと（特に下流側の山付部近傍）、そこに大きな越流水深での大量の越水が一時に生じたため、さらに堤防際の水路を遡上してきた津波の氾濫がそれに加わったため、堤内地の水位が急上昇したと考えられる。この様子は新北上川[L-4]の津波の堤防越水開始から堤内地が浸水していく状況を時系列的に撮影した写真¹⁶⁾で確認できる。また阿武隈川[R-2]の場合は、河口にごく近いため、海岸堤防を越えて遡上してきた津波によって、堤内側の水位が急上昇した可能性が考えられる。

これら堤内側のり尻近傍の水位急上昇が堤防のり面の侵食進行を抑制するウォータークッションとしての効果が発揮するとともに、1mを越えるような激しい越水をクッション効果なしで受ける状況をごく短時間に留めたことが、破堤に至らなかった要因の一つであると推察される。阿武隈川[R-2]の場合には、天端まで設置された川側のり面のコンクリート護岸が、天端から川側のり面への堤体侵食の進行を抑制したことも、要因として加えられよう。

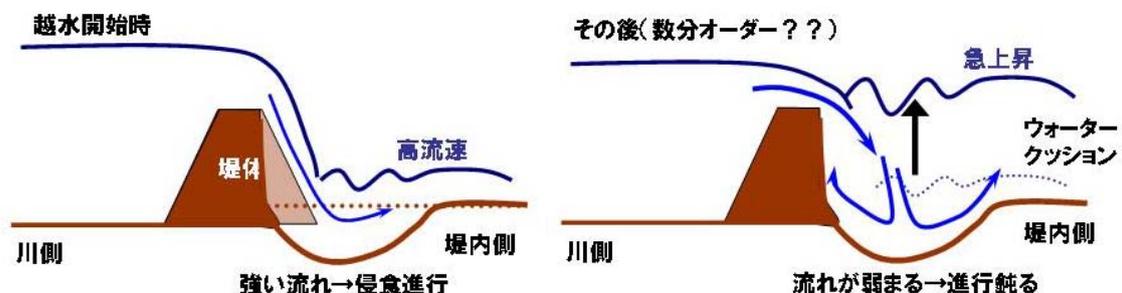


図-6.60 津波の堤防越水に伴う堤内側の水位急上昇による侵食進行の抑制イメージ

②「堤防越水区間」に位置する新北上川[L-5]、阿武隈川[R-3]

越流水深は「堤防水没区間」に比較して概して小さいこと、さらに堤防天端の冠水には至らないものの堤内側において水位上昇が生じてウォータークッションの効果が発揮されたことにより、侵食の進行が抑制され、破堤には至らなかったと推定される。

また、痕跡水位によると堤内のり尻近傍の水深が比較的小さい阿武隈川[R-4~R-7]では、上記①、②に比較して堤内側のり面の侵食の程度は[R-7]を除いて軽微である。これは「堤防越水区間」であるものの越流水深が小さいこと、さらに越水の継続時間が比較的短時間であったためと推察される。その時間の大きかな目安となるのは**図-6.56** に示した津波遡上時の水位変動であり、これによると約30分程度の間で水位が急上昇したのち下降に転じて低下している。また、のり尻や小段面がアスファルト等による舗装がなされて

いた場合、場所によっては落堀の形成を防止・緩和していると思われる箇所があった。これらが相まった効果によって、侵食が比較的軽微になったと推察される。

なお、阿武隈川[R-7]は湾曲部外岸側に位置していたため、痕跡水位によると河道内の水位が高くなっており、そのため[R-4~R-6]に比較して大きく侵食されたと考えられる。

図-6.61 に阿武隈川右岸の痕跡水位と堤防被災程度の縦断分布に、天端パラペットの流失区間、および堤防のり面が津波遡上を受けるように河口に対して「斜め」を向いているかまたは「沿う」方向であるかの区分を併記した。これによると、パラペット流失は主に「斜め」の区分で生じており、そこではパラペットの高さの分だけ越流水深が大きくなったため堤内側のり面の被災程度が大きくなる傾向が見られる。

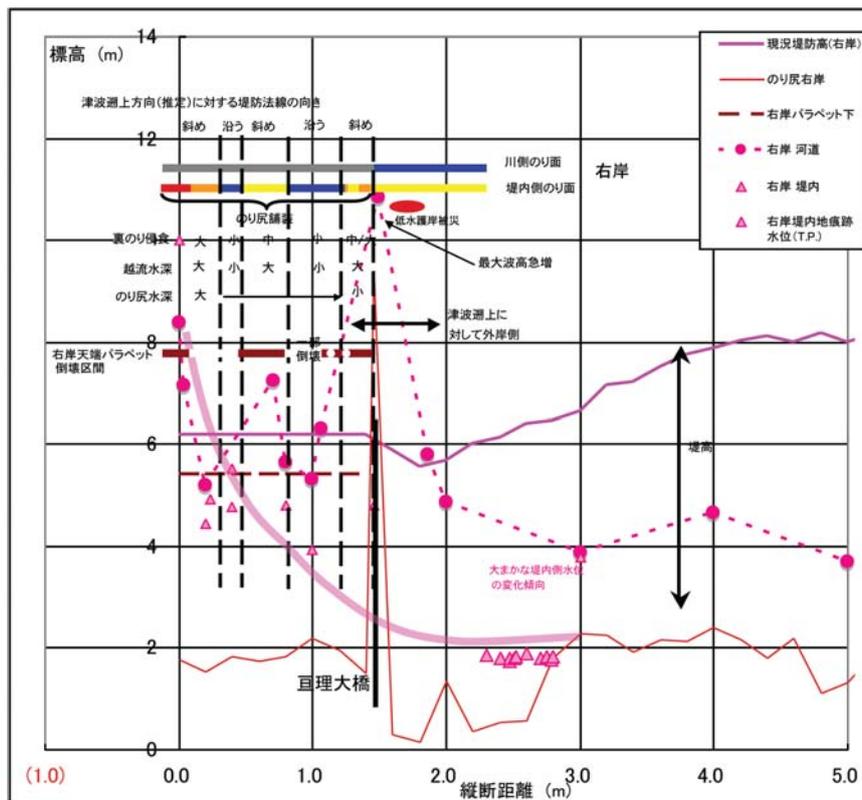


図-6.61 阿武隈川右岸の痕跡水位と堤防被災程度の縦断分布
(痕跡水位・堤防等諸元は東北地方整備局よりデータ提供)

以上より、越流によるのり面侵食の被災（破堤を含む）について検討するにあたって、津波遡上に関わる事項として「越流水深の大きさ」、「堤内側のり尻の水深（ウォータークッションの効果）」、「越流の継続時間」について着目し、比較することが重要であると考えられる

なお、堤内側から川側に越水した区間（名取川[L-2~L-4]）では、川側のり面に越流による侵食が見られた。ただし、侵食はのり肩部など堤防上部で顕著であり、落堀は見られない、または不明瞭であった。この理由として、河川内の津波遡上が堤内側より先行して生じるため、堤内側からの越水が生じる段階では、川側はある程度水位が上昇しており、これが図-6.60 と同様に越水を減勢するウォータークッションとしての効果を発揮したた

めと推察される。

(3) 河道内の津波遡上流れによる堤防のり面の侵食

河道内を津波が遡上する際の流れの作用による土堤の川側のり面の損傷で最も著しいものは、全面的に植生が剥離し、堤体土まで侵食が及んだものである（例えば名取川[L-2]、新北上川[L-2]）。しかし、(2)の越水による侵食に比べると、侵食の程度は概して軽微であり、川側からの侵食によって堤防断面が著しく減じた地点は認められなかった。

植生の剥離は「津波水没区間」で多く見られ、「堤防高以下遡上区間」ではほとんど生じていなかった。これは天端の冠水・非冠水といった水位の差違によるものではなく、前者は河口に近いためある程度流速が速く、その継続時間も長めである箇所であったためと推察される。

直轄区間のように毎年草刈りを実施している堤防のり面の場合、植生の耐侵食性の発揮機構²¹⁾は、侵食の進行に伴って地表面に洗い出された地表面近傍の植生の根や地下茎が流水の抵抗となり、地表に作用する侵食力が低減されるためと考えられている。しかしながら図-6.62に示すように徐々に侵食が進行するため、ある一定の侵食深に達すると植物が根とともに剥離してしまうため、植生の耐侵食性が失われる。この剥離が生じるまでの時間が流速の増加に伴って小さくなることが実験によって確かめられている。

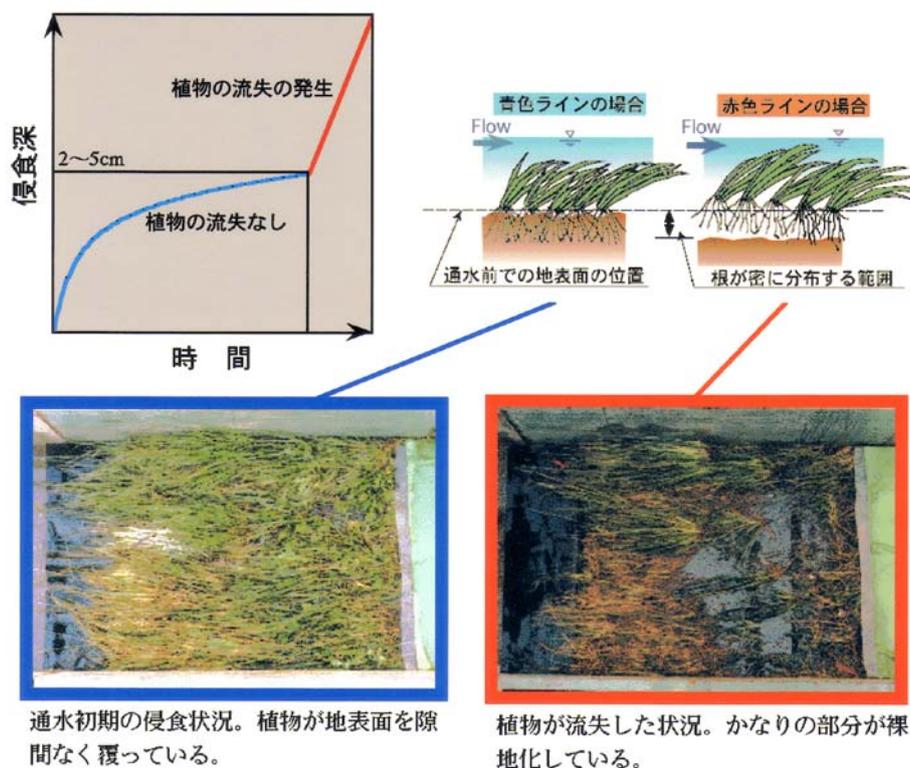


図-6.62 植生に被覆されたり面の侵食進行に伴う植生の剥離²¹⁾

このような機構を考慮すると、津波遡上のようにある程度流速が速い場合でもその継続時間が短ければ、植生によって十分に侵食防止が可能であると考えられる。名取川[L-2]、新北上川[L-2]では、その条件を越えて植生が全面的に剥離したと考えられるが、堤

体が溝状に凹んだ程度の比較的軽度の侵食で留まったのは、のり面が粘着性を有する材料で構成されていたことから、流水に対して耐侵食性を発揮したためと推察される。

以上より、今次の大規模な津波に対して植生が侵食されたかどうかという単純な事実関係の整理のみではなく、外力との耐力の兼ね合い、すなわち津波によっては比較的短時間の外力作用となる場合があり、その場合、どの程度までの流速であれば植生の耐侵食力で侵食防止できるか、上記の発揮機構に基づいて検討を行うことが、他河川を含めた津波に対する堤防安全性評価に繋げていく上で重要と考える。

(4) 護岸の被災

現地踏査時に目視により確認した津波遡上流れによる堤防のり面上の護岸（高水護岸）の被災（新北上川[L-4]、名取川[R-1]）は、いずれも水門に隣接する護岸ブロックのめくれ上がり・流失であった。その他、阿武隈川[R-5]におけるのり覆工の変形（空中写真の赤丸部：原因不明）、鳴瀬川[R-2]における堤内側からの越水によるブロックのめくれ上がりが見られた。

低水護岸については、水面上から見える範囲の確認に留まるが、新北上川および阿武隈川の湾曲部上流地点で低水護岸の崩落（写真-6.109(a), (d)の赤丸部）が生じていると思われる。その他の軽微なものとして、やはり湾曲部外岸における捨石工の打ち上げ（新北上川[R-3]、阿武隈川[R-7]）が見られた。これら被災状況は、湾曲外岸部における波高増加など津波の挙動と何らかの関連性があると推察される。湾曲部の津波の挙動については、水位のみでなく構造物の安定性に関わる流体力の観点からも検討することが必要であろう。

(5) 流送物の衝突による損傷

津波遡上時に流送されてくる樹木やがれきなど流送物が接触することにより生じたと思われる堤防等の損傷が散見された。阿武隈川[R-3]におけるパラペット上の金属製手すりの折れ曲がりや折損、名取川[L-3, L-4]における堤内側からの越水に伴うがれきによる擦れが原因と考えられるのり面の溝状の損傷などが挙げられる。また、新北上大橋の脇に流れ着いていた流木（新北上川[R-1]）は、その大きさや量から流送物の接触のインパクトを推し量ることができよう。

津波遡上に対する対策の検討（例えば集積による水位上昇に対する堤防高の余裕や接触に対する構造物の応答）において、流送物に対する配慮の必要性について考えてみる必要があると思われる。

6.4 まとめ

本章では、東北地方太平洋沖地震による河川施設の被災状況について、地震動の影響、津波の影響の観点から、現地調査等に基づく特徴的な被害の状況について報告するとともに、被災パターンの分類、被災原因に関する考察を行った。

地震動による河川施設の被害の特徴をまとめると以下のとおりである。

(1) 東北地方整備局管内、関東地方整備局管内において広範囲にわたり河川堤防の被害が

生じた。

- (2) 東北地方整備局管内では、阿武隈川、鳴瀬川、江合川等の河川堤防において、地震動による甚大な被害が生じた。これらの堤防の主たる被災要因としては、堤体下部の液状化によると考えられるものが多数見られたことが特徴的であった。また、東北地方で観測された地震動には2つの大きなフェーズが見られるが、中下震動観測所の記録によれば、1つ目のフェーズで上昇した過剰間隙水圧が残留したままの状態ですべてのフェーズの地震動を迎えていることが分かった。甚大な被害を生じた他の堤防では、このことが大規模崩壊等の被害の一因となっている可能性がある。
- (3) 関東地方整備局管内では、久慈川、那珂川、利根川、霞ヶ浦、小貝川、江戸川等の河川堤防において、地震動による甚大な被害が生じた。大規模な堤防被害が生じた箇所は、旧河道およびその近傍に位置するものが多く見られたのが特徴的であった。
- (4) 大規模な堤防被害に着目すると、被災要因としては堤体下部の液状化および基礎地盤の液状化が考えられる。ただし、これらの複合的な要因によるものも考えられ、また、これらのいずれにも属さない被災パターンも見受けられた。どの部分の変状が主たる被災要因であったかについては、今回の地震による堤防の復旧工法の検討に加え、堤防の耐震性評価および対策のあり方を考えていく上で極めて重要であることから、被災要因の詳細について、さらなる調査・検討を行うことが必要である。
- (5) 浸透・耐震対策された河川堤防では、被害が抑制ないしは防止され、対策効果が発揮されたことが確認された事例が見られた。今後の復旧あるいは耐震対策を行うにあたって極めて重要な事例であることから、引き続き検証を行う必要がある。

津波による河川施設の被害については、新北上川、鳴瀬川、名取川および阿武隈川を対象に津波遡上の水位（川側と堤内側）や流れの向きについて整理するとともに、それと関連づけて堤防等の被災の形態や程度について検討した。結果として得られた主要な事項を以下に示す。

- (1) 河川周辺の堤内陸域への津波遡上に先行して河道内を遡上すること、その遡上状況を河道法線形と盛土・山脚など高地部の配置によって4パターンに分類した。
- (2) 破堤について被災の程度が大きい被災形態は越水による堤内側のり面の侵食であり、河道内の津波遡上に伴う流れによる川側のり面の侵食では、概して堤防断面を大きく減じるような被災には至っていなかった。
- (3) 約1mを越えると推定される越水を受けながら破堤に至らなかった一つの有力な要因として、のり尻およびり面の侵食進行を抑制するウォータークッションの効果を発揮するとともに、越水をクッション効果なしで受ける状況をごく短時間に留めたと考えられる堤内側のり尻近傍の水位急上昇が考えられる。
- (4) 洪水流に対する堤防植生の耐侵食力の発揮機構に関する既往知見を適用して、高流速であってもその継続時間が短い津波遡上の場合には、現地調査で確認されたように植生によってもり面侵食が抑制できる場合があると考えられる。また、植生が全面的に剥離した区間において、比較的軽微な侵食で留まったのは、堤体土自体も粘着性があり、相応の耐侵食力を有する材料であったことも要因の一つであると考えられた。

参考文献

- 1) 国土地理院：治水地形分類図
- 2) 建設省土木研究所：1978年宮城県沖地震災害調査報告，土木研究所報告，No.159，1983.3.
- 3) 建設省東北地方建設局：1978年宮城県沖地震災害報告書，1979.11.
- 4) 金子正之，田村圭司，佐々木康，勝山明雄，佐藤謙司：平成5年釧路沖地震による河川堤防被害について，第29回土質工学研究発表会講演集，pp.973-974，1994.
- 5) 佐々木康：堤防の地震災害と災害軽減工学，JICE REPORT，Vol.9，pp.85-96，2006.3.
- 6) (財)北海道河川防災研究センター：平成15年十勝沖地震河川災害調査検討会報告書，2004.3.
- 7) 鳴瀬川堤防委員会，国土交通省東北地方整備局北上川下流河川事務所：宮城県北部地震に伴う鳴瀬川堤防被災メカニズムの検討 報告書，2005.3.
- 8) 関沢元治，佐藤伸吾，中山修，鈴木義友，勝山明雄，小松田孝寿，杉浦達也，太田史郎，平塚智幸：宮城県北部地震による河川堤防被害調査について，河川技術論文集，No.10，pp.261-266，2004.
- 9) 折敷秀雄，佐々木康：液状化により被災した河川堤防の地盤改良を併用した復旧，土木学会論文集，No.686，pp.15-29，2001.9.
- 10) 佐々木康：河川堤防の地震被害，土と基礎，Vol.28，No.8，pp.25-30，1980.
- 11) 河川構造物地震対策技術検討委員会：河川構造物地震対策技術検討委員会報告書，1996.
- 12) 国土交通省国土政策技術総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成16年(2004年)新潟県中越地震土木施設災害調査報告，土木研究所報告，No.203，2006.1.
- 13) 松尾修，日下部毅明，上原浩明，関沢元治，佐藤伸吾：2003年宮城県北部地震における締固め改良地盤での地震動・間隙水圧記録，第59回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-775，pp.1547-1548，2004.
- 14) Takahashi, A. & Sugita, H. : Behavior of SCP-improved levee during 2003 Miyagiken-Hokubu Earthquake, IS-TOKYO, Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, pp.177-184, 2009.6.
- 15) 片岡正次郎，谷本俊輔，中島進，松橋学，高宮進：観測記録に基づく河川堤防の地盤改良効果の検討，第13回日本地震工学シンポジウム，2010.11.
- 16) 国土交通省東北地方整備局：北上川等堤防復旧技術検討会資料，http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/taiheiyuokijishinn/kenntoukai/shiryuu2_1.htm
- 17) NHK：津波の様子（宮城県名取市），<http://www3.nhk.or.jp/news/jishin0311/>
- 18) 国土交通省東北地方整備局：災害調査ヘリコプターからの津波遡上状況のビデオ映像
- 19) 国土地理院：http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html
- 20) 後藤智明，首藤伸夫：河川津波の遡上計算，第28回海岸工学講演会論文集，pp.64-68，1981.
- 21) 宇多高明・望月達也・藤田光一・平林桂・佐々木克也・服部敦・藤井政人・深谷渉・平館治：洪水流を受けた時の多自然型河岸防壁工・粘性土・植生の挙動－流水に

対する安定性・耐侵食性を判断するために，土木研究所資料，第 3489 号，1997.