

第 3 回 北上川等堤防復旧技術検討会

中間報告書（案）

平成 23 年 7 月 29 日（金）

国土交通省 東北地方整備局

北上川等堤防復旧に関する中間報告書（案）

平成23年5月30日

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

目 次

はじめに	1
1. 東北地方太平洋沖地震と直轄河川管理施設の被害の概要	
(1) 東北地方太平洋沖地震	
1) 地震諸元（本震）と各地の震度	3
2) 地震動	4
3) 余震	6
4) 地殻変動	8
5) 津波	11
(2) 直轄河川管理施設における被災の概要	
1) 東北地整管内の河川管理施設の被災	13
2) 緊急復旧	14
3) 地震と被災の概要のまとめ	17
2. 堤防被災の特徴と本復旧工法	
2. 1 地震被災	
(1) 地震による堤防被災の特徴	
1) 堤防被災の形態	18
2) 堤防被災箇所と微地形	29
3) 堤体の土質と地下水位	30
4) 堤防被災箇所の天端沈下量	31
5) 既往地震による被災箇所の状況	34
6) 堤防被災の主要因の推定	35
(2) 本復旧の基本方針	
1) 基本方針	39
2) 復旧工法	40
2. 2 津波被災	
(1) 津波による堤防被災の特徴	
1) 堤防構造と被災状況	43
2) 堤防被災の形態	47
3) 被災過程の推定	48
(2) 本復旧の基本方針	50
3. 堤防等被災後の河川管理方針	
1) 被災した堤防等の施設管理	52
2) 危機管理	53
あとがき	54

はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生し東北地方整備局管内の馬淵川、北上川、江合川、鳴瀬川、阿武隈川など直轄河川の堤防に損傷を受けた。

東北地方整備局は北上川等堤防復旧技術検討会を設置し、2011年4月14日に第1回検討会を、同5月6日に第2回検討会を開催した。

この中間報告書（案）はこれら2回の検討会で審議された結果を踏まえ、一部資料を追加して暫定的に取りまとめたものである。

今次地震災害は津波を伴うもので多くの犠牲者・行方不明者を出す未曾有の大震災であり、被害地域も極めて広域にわたり、堤防被害についての調査も現時点（5月17日）においてさえ終了しておらず、出水期に備える緊急復旧工事も完成していない箇所が残る状況である。この中間報告書（案）を暫定的に取りまとめた背景は、このような状況を踏まえ、迅速・的確な災害復旧工事を推進する一助としての技術的見解を提示する必要があるからである。

現時点までに収集できた各種資料・データに基づき、暫定的ではあるが被害機構に関する見解をまとめ、損傷した堤防の復旧方法についての方針案を提示するとともに、被災した区間・箇所の復旧が完成するまでの間の河川堤防の管理・河川管理の方針を提示することとした。

東北地方整備局管内の河川管理施設の被災箇所は1195箇所へのぼり、このうち773箇所は堤防の被災である。発災直後から29箇所を対象に緊急復旧事業が実施されてきたが、この中から特に損傷の甚大と認められた9箇所を選択し、損傷の実態・被災機構ならびにその復旧方針を中心に審議した。

今後これら9箇所の箇所についての被災機構の解明や今後の教訓を探る作業の充実を図るとともに、その他の箇所も含めて被災実態の整理を進め、今後の教訓を得るための作業を継続する。

なお、この中間報告（案）のまとめに当たっては、2種類の枠書きを用いることとした。二重線で囲った枠書きには観察された事象（客観的事実）ならびに事象の解釈（復旧の基本方針の是非を判断する材料等）を示し、一重の線で囲った枠には参考事項（今後さらなる吟味の必要なものを含む）を示した。

検討会開催経過と今後の開催予定

第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
2011年4月13日	2011年5月6日	2011年7月 (予定)	2011年9月 (予定)	2011年10月 (予定)

検討会構成員

委員長	佐々木 康	広島大学 名誉教授
委員	岡村 未対	愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻 教授
委員	風間 基樹	東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授
委員	田中 仁	東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授
委員	真野 明	東北大学大学院 工学研究科 附属 災害制御研究センター 教授
委員	宮本 健也	国土交通省 河川局 治水課 企画専門官
委員	服部 敦	国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室長
委員	田村 敬一	独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 耐震総括研究監
委員	佐々木 哲也	独立行政法人 土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤研究グループ 上席研究員
委員	田上 澄雄	国土交通省 東北地方整備局 河川部 部長
委員	川崎 博巳	国土交通省 東北地方整備局 仙台河川国道事務所 所長
委員	島田 昭一	国土交通省 東北地方整備局 北上川下流河川事務所 所長

【事務局】

国土交通省東北地方整備局 河川部
 仙台河川国道事務所
 北上川下流河川事務所
 財団法人 国土技術研究センター

1. 東北地方太平洋沖地震と直轄河川管理施設の被害の概要

(1) 東北地方太平洋沖地震

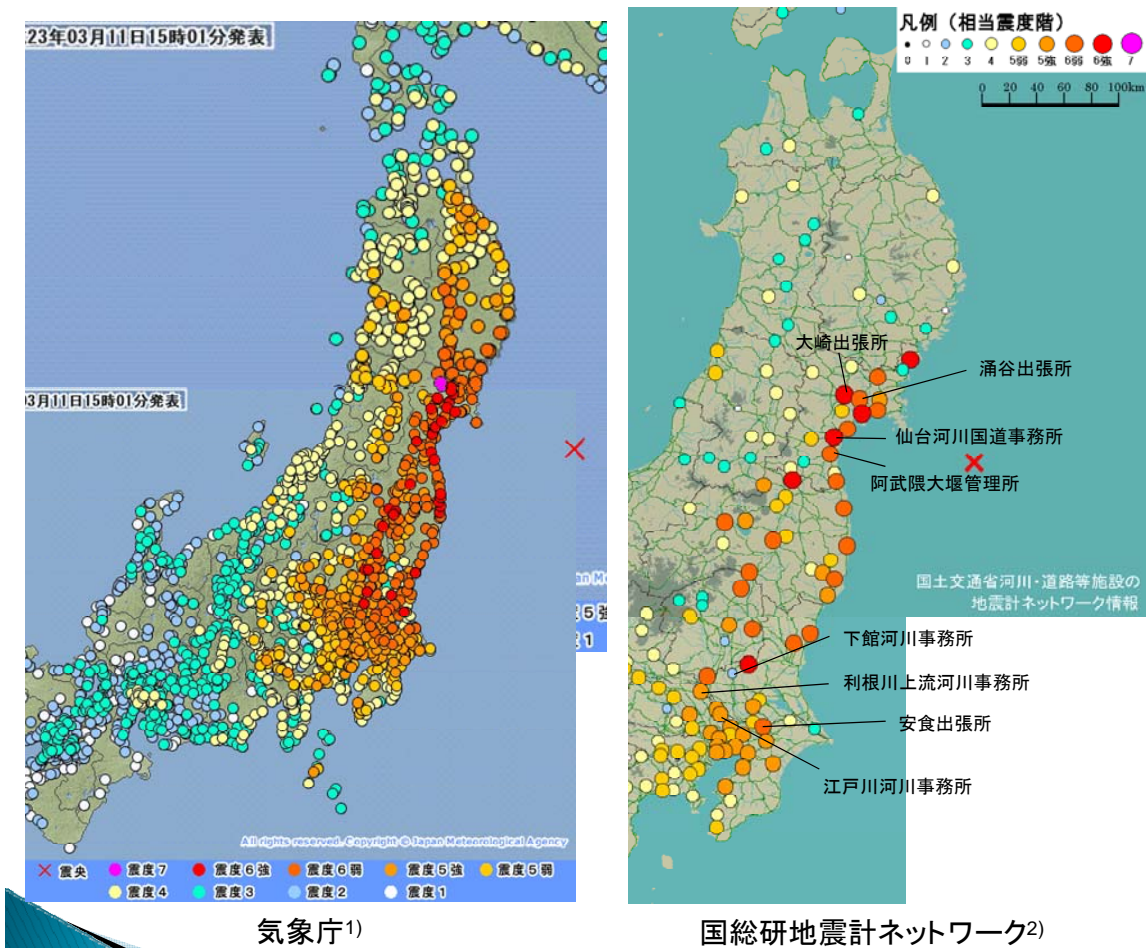
1) 地震諸元 (本震) と各地の震度

【地震諸元 (本震)】 (気象庁発表資料による)

地震名 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」
 (東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う原子力発電所事故による災害については、「東日本大震災」と呼称。)
 発震日時 平成 23 年 (2011 年) 3 月 11 日 14 時 46 分頃
 震源位置 北緯 38°0.0'N 東経 142°54.0'E 三陸沖 (牡鹿半島の東南東、約 130km 付近)
 深さ約 24km (暫定値)
 地震規模 M9.0 (暫定値) (当初は 7.9、その後 8.8 と修正、3 月 13 日発表の第 15 報で M=9.0 に修正)
 発震機構等 西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型 (CMT 解)

【各地の震度】

宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、栃木県、茨城県の 4 県 28 市町村で震度 6 強を観測したほか、東北・関東地方を中心に、広い範囲で震度 5 強を観測した。



1) 気象庁：地震情報, <http://www.jma.go.jp/jp/quake/>

2) 国土政策技術総合研究所：国土交通省河川・道路等施設の地震計ネットワーク情報
<http://www.nilm.go.jp/Japanese/database/nwdb/>

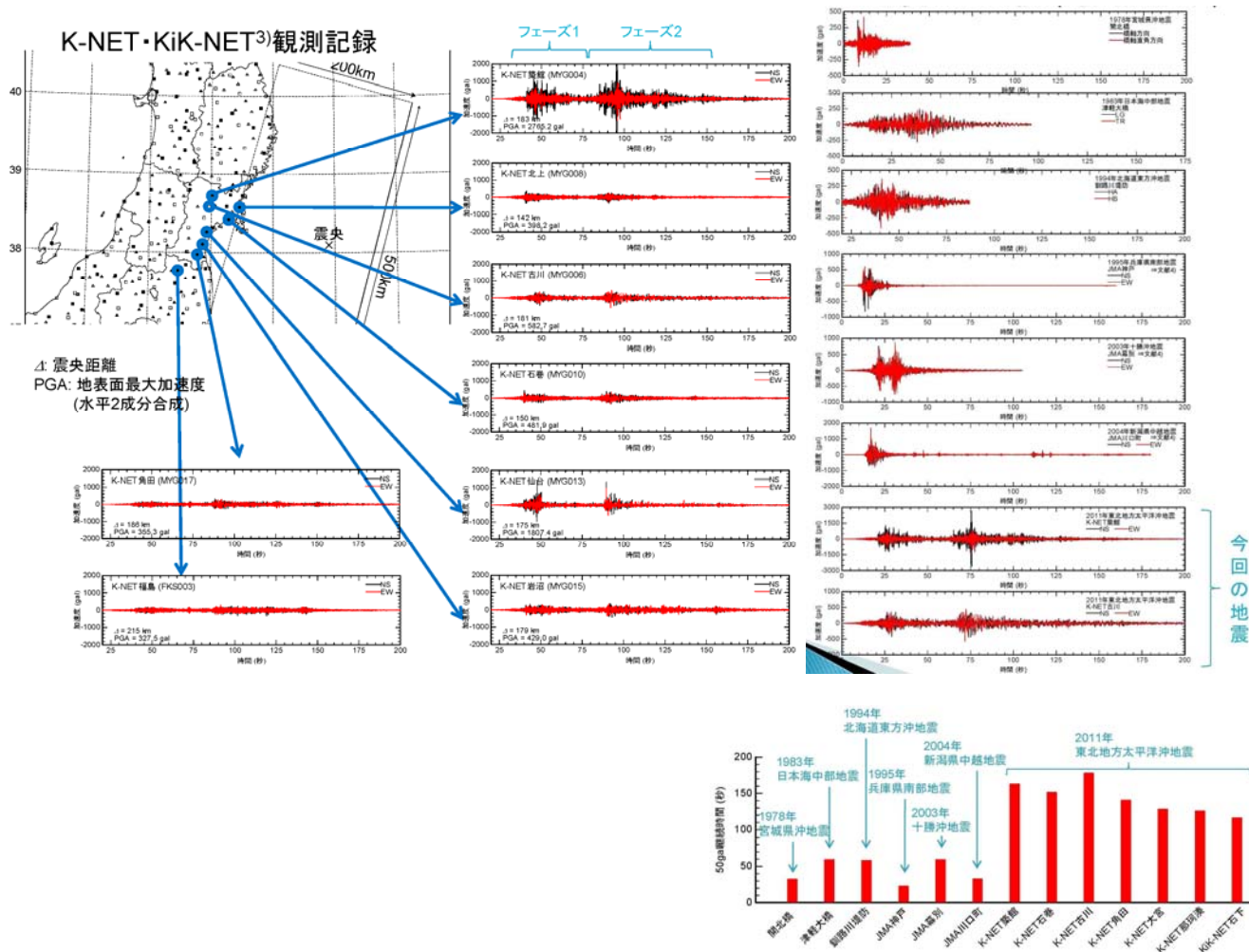
図-1 震度分布

独立行政法人 土木研究所 資料 平成 23 年 5 月 2 日より引用

2) 地震動

【地震動波形および継続時間】

防災科学技術研究所が公開している情報をもとに（独）土木研究所が作成した資料によれば、最大加速度は石巻 482gal、古川 583gal、岩沼 429gal、角田 355gal であり、液状化に影響を及ぼすと考えられる 50gal 以上の継続時間は 140 秒 ~ 178 秒と長く、過去の主要な地震と比較しても非常に長いことが特徴である。



3) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-NET），
<http://www.kyoushin.bosai.go.jp/kyoushin/>

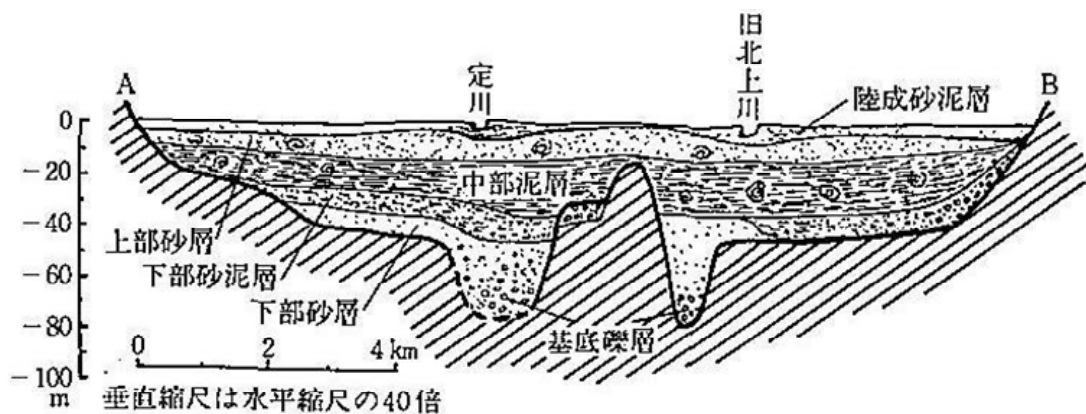
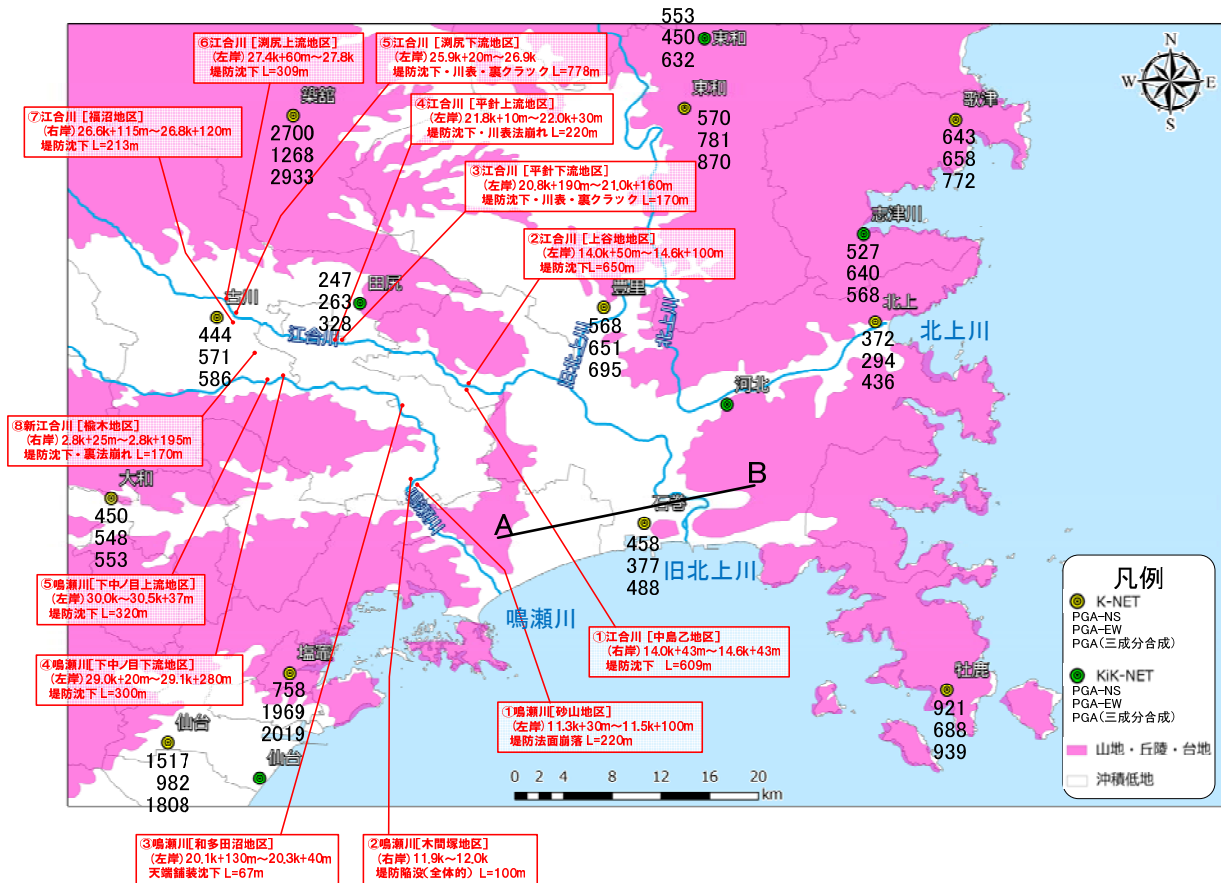
図－2(1) 地震動波形および過去の主な地震との地震動の比較

独立行政法人 土木研究所 資料 平成23年5月2日より引用

ここでは、継続時間を①水平2成分の観測波形をベクトル合成し、②初めて50galを観測した時刻と、最後に50galを観測した時刻の差として求めている。（「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説：国土交通省河川局治水課、平成19年3月」I 共通編5.7 解説における継続時間の定義は、最大加速度の発生時刻から、地震動の加速度振幅が最後に50galを下回る時刻までの時間である。）

【被災河川周辺の最大加速度】

図-2(2)の範囲の被災河川周辺の地盤での観測最大加速度は、450~570ガル程度である。江合川、鳴瀬川中流域の沖積層の厚さは、30~40m程度と考えられるが、概ね10m以上の厚さの粘性土層が堆積し、その上下に砂質土層が互層をなしている。



貝塚爽平・成瀬洋・太田陽子：「日本の平野と海岸」、岩波書店 P.104 の北上山地南端部の地形と石巻平野の断面図に加筆
 最大加速度値は防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET、KiK-NET)、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

図-2(2) 宮城県内の堤防被災箇所周辺の最大加速度

「日本の平野と海岸」(1985)に記載されている沖積低地の広がりとは強震計の設置地点の関係を示した。

3) 余震

【余震】

今回地震の余震（マグニチュード5以上）発生回数は平成23年4月28日15時現在で435回に到達しており、海域で発生した主な地震の余震回数との比較でも非常に多い。（図-3(1)）震度5弱以上（土木施設の点検を要する震度）の余震の発生状況を図-3(2)に示す。

海域で発生した主な地震の余震回数比較（※本震を含む）
（マグニチュード5.0以上）

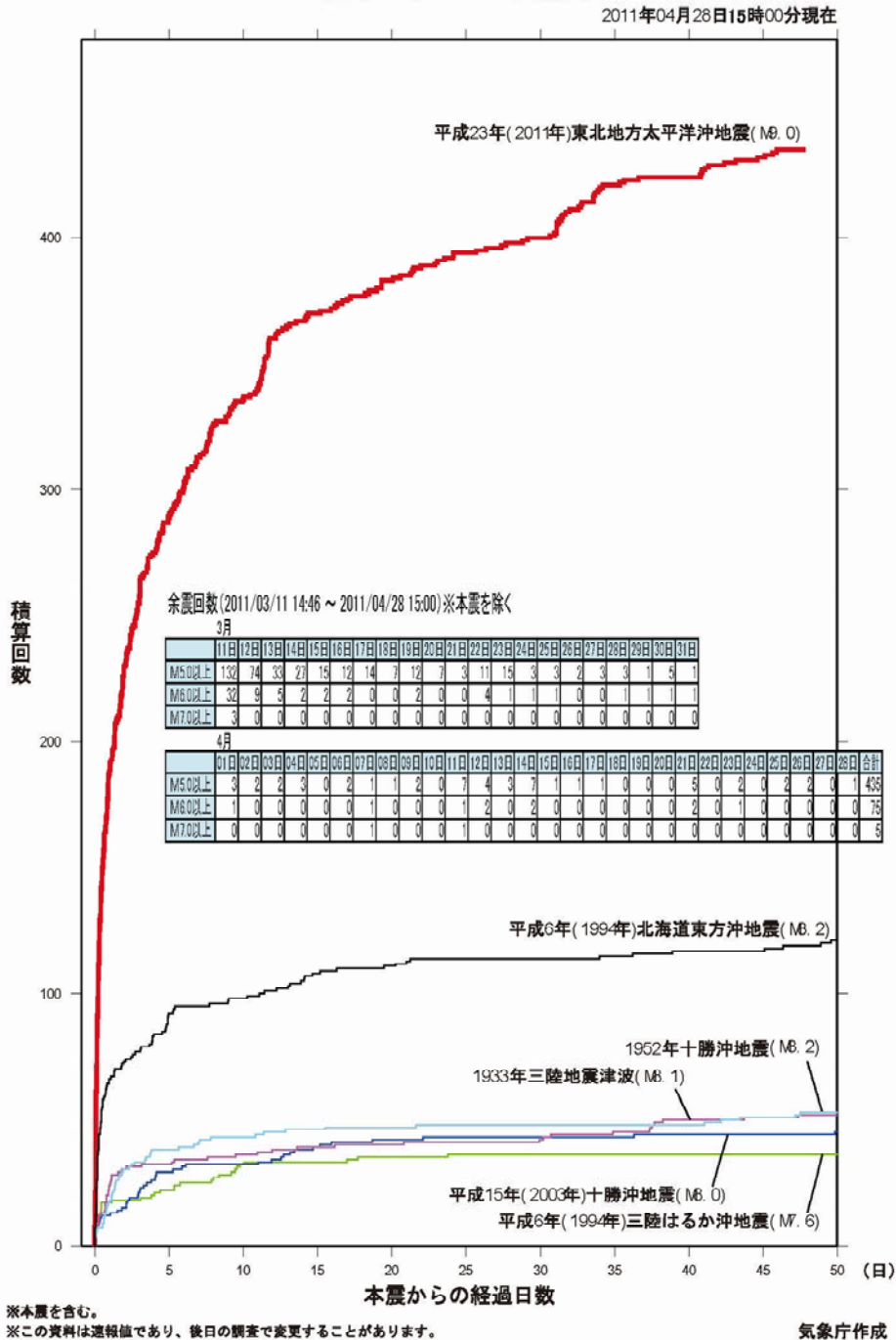
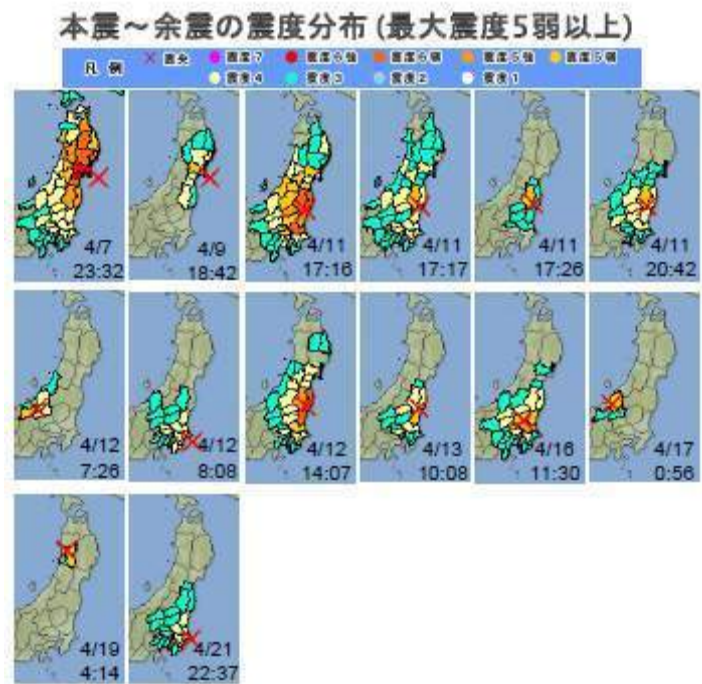
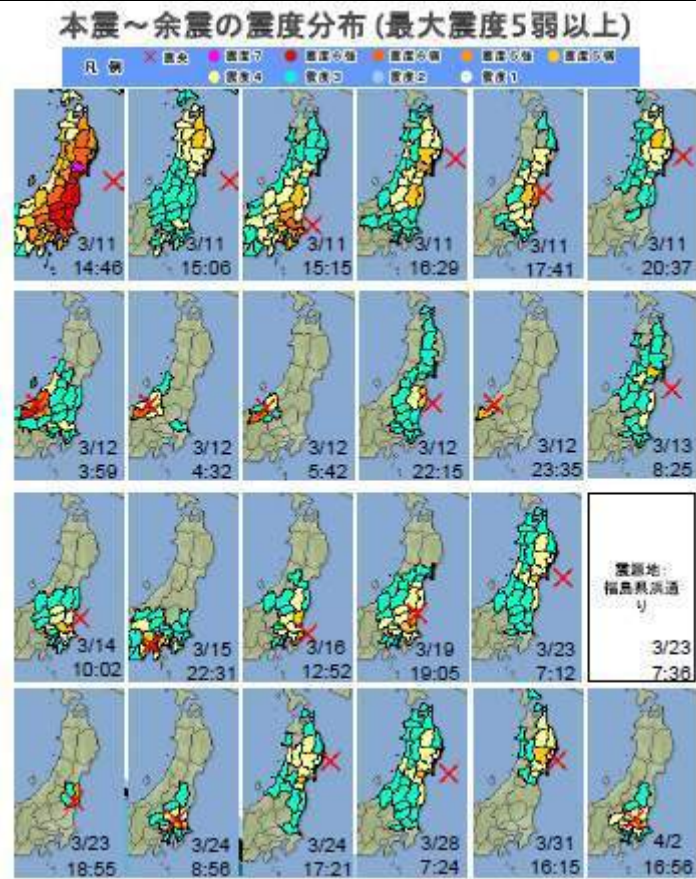


図-3(1) 主な地震における余震回数比較



独立行政法人 土木研究所 資料 平成 23 年 5 月 6 日より引用

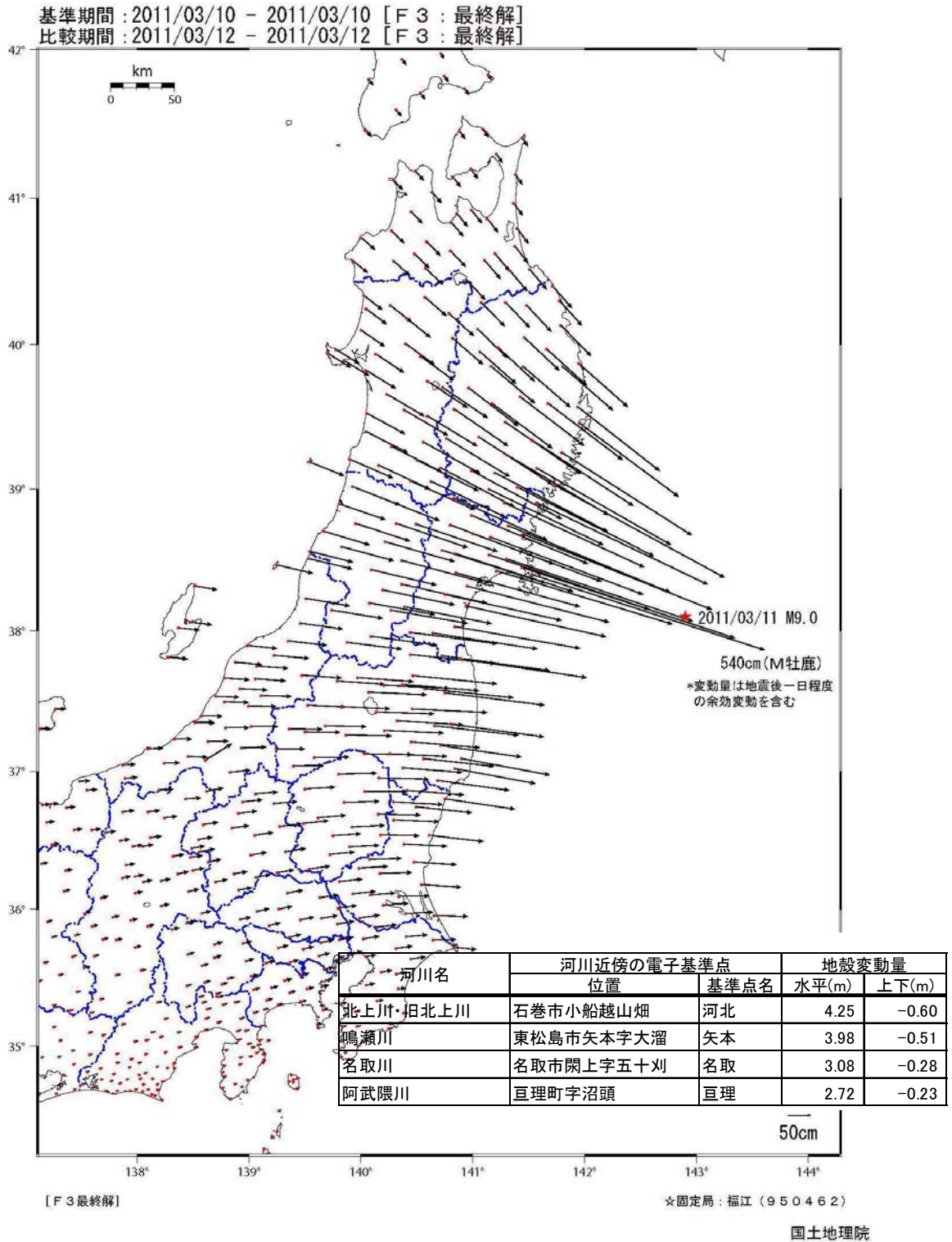
図-3(2) 本震～余震の震度分布 (最大震度5弱以上)

3 月 11 日の本震の後にも震後点検を要する大きな地震が度々発生している。その影響範囲は広域である。

4) 地殻変動

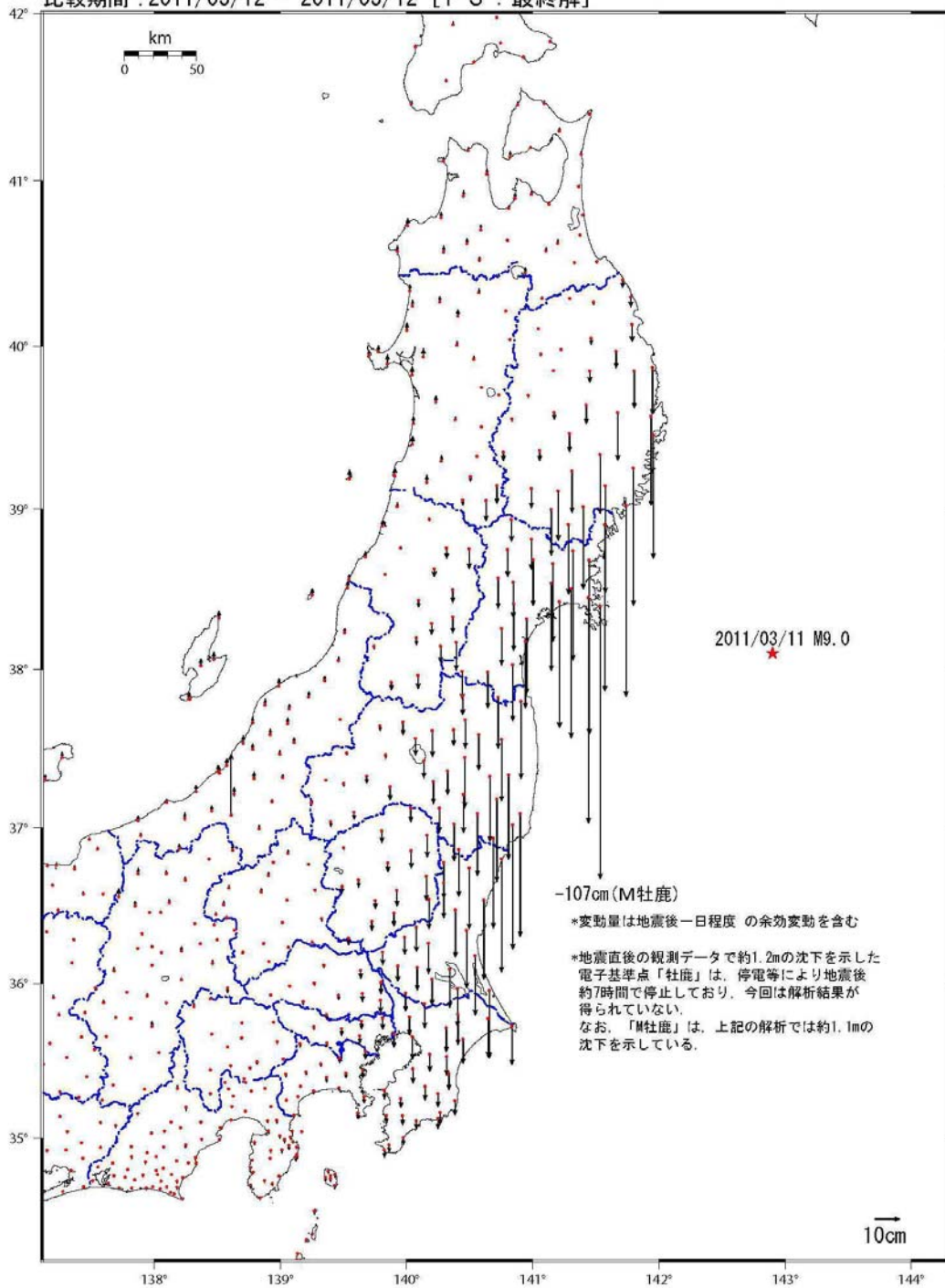
【地殻変動】

東北地方太平洋沖地震により広範囲にわたり地殻変動が生じており、北上川から阿武隈川の河口部では約 60cm～20cm の沈下（地盤沈降）が生じている。



図－4(1) 地震による地殻変動（水平）

基準期間 : 2011/03/10 - 2011/03/10 [F 3 : 最終解]
 比較期間 : 2011/03/12 - 2011/03/12 [F 3 : 最終解]



[F 3 最終解]

☆固定局 : 福江 (9 5 0 4 6 2)

国土地理院

河川名	河川近傍の電子基準点		地殻変動量	
	位置	基準点名	水平(m)	上下(m)
北上川・旧北上川	石巻市小船越山畑	河北	4.25	-0.60
鳴瀬川	東松島市矢本字大溜	矢本	3.98	-0.51
名取川	名取市関上字五十刈	名取	3.08	-0.28
阿武隈川	亶理町字沼頭	亶理	2.72	-0.23

図-4(2) 地震による地殻変動 (上下)

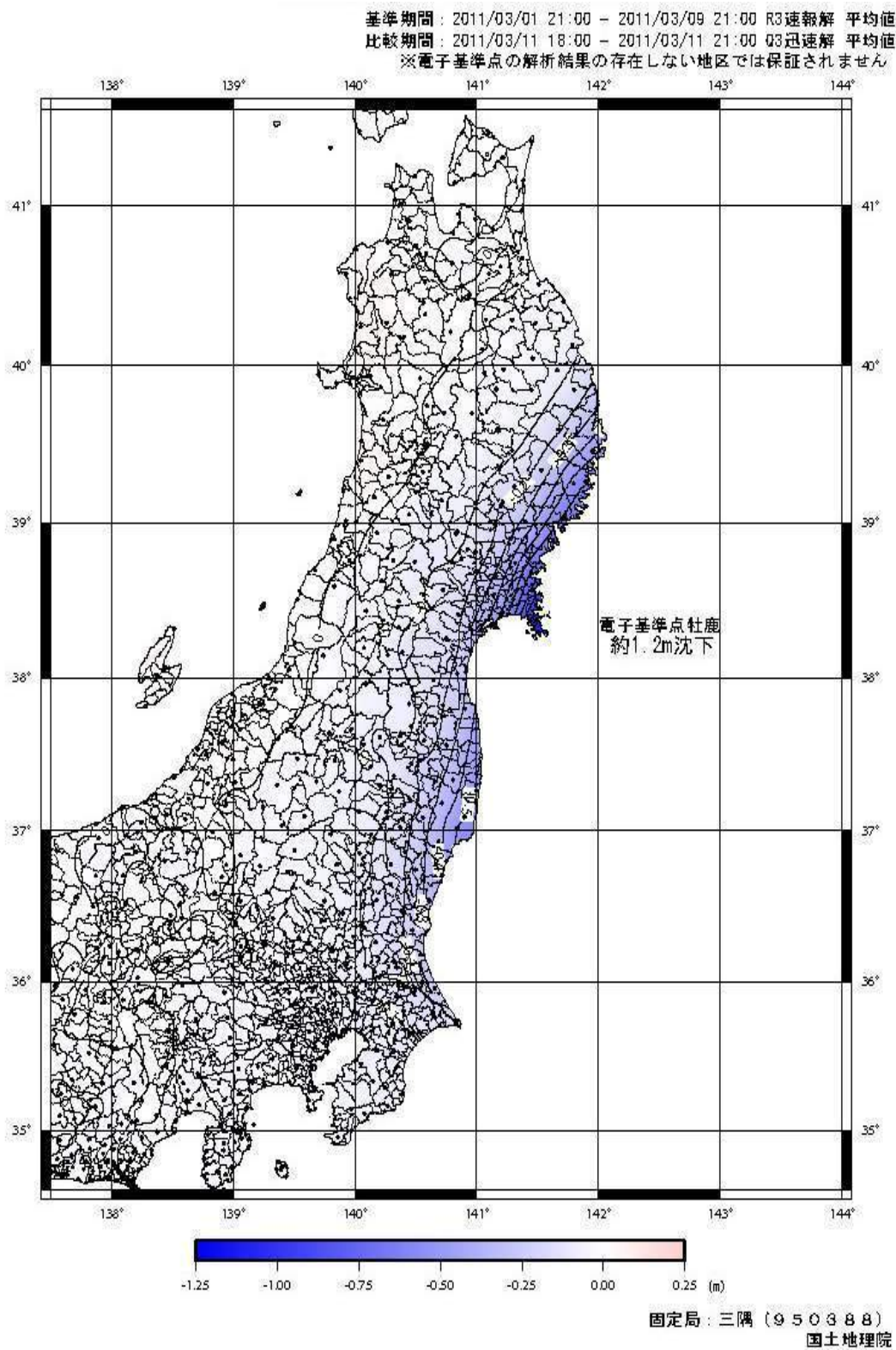
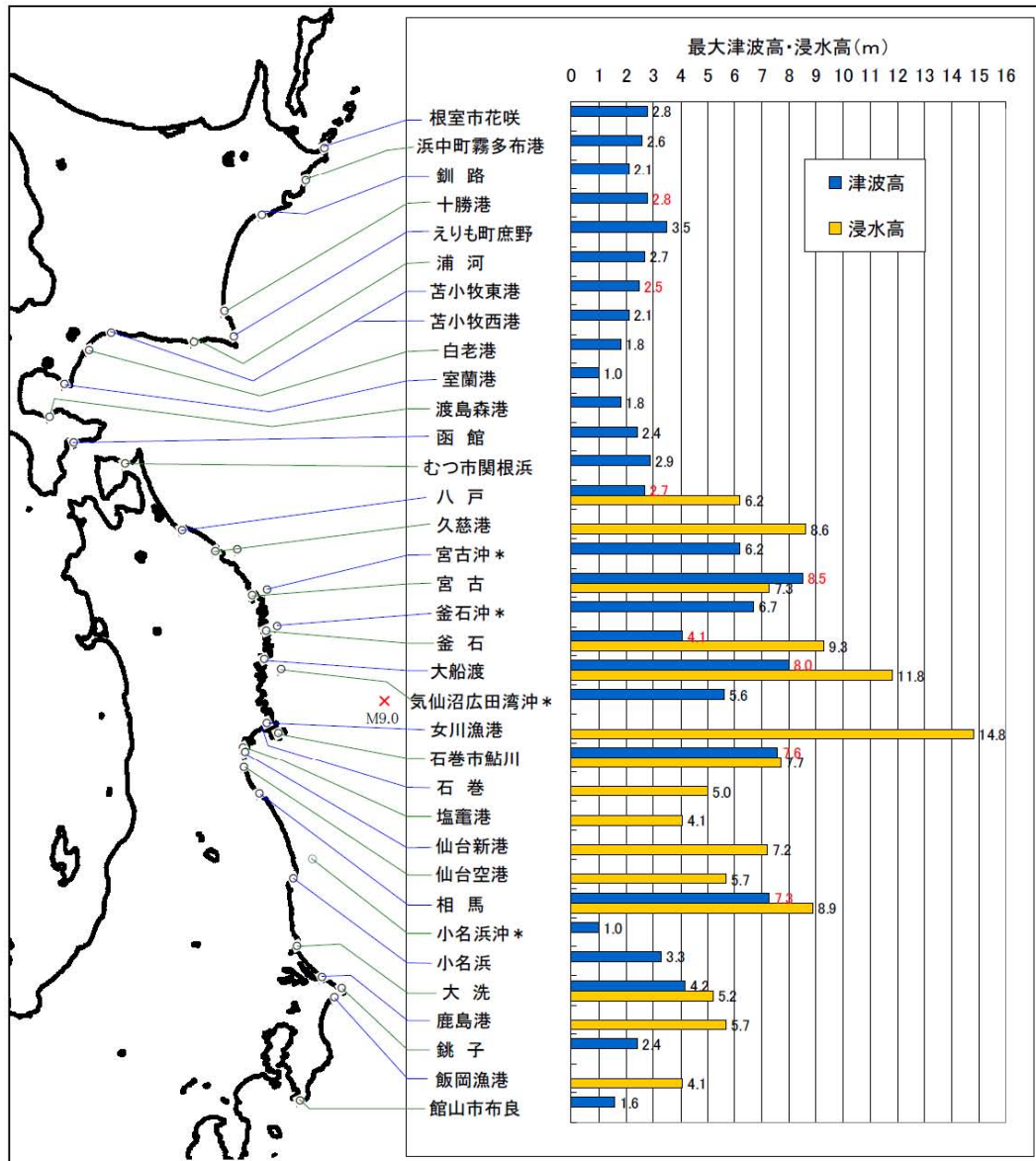


図-4(3) 地震による地殻変動等変動量線図(上下)

5) 津波

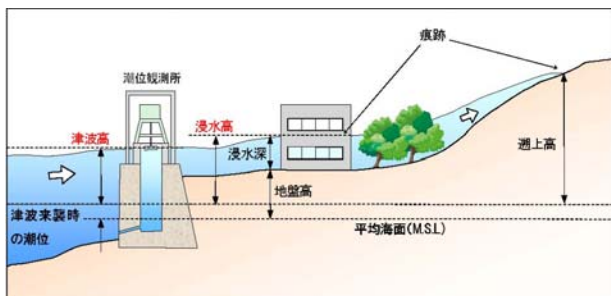
東北地方太平洋沖地震により発生した津波は、太平洋沿岸に襲来し、東北地方での津波高は2.7m～8.5m以上とされ、陸上部ではさらに高い痕跡高が確認されている。

また、津波は河川を遡上し、北上川では河口から約49km地点まで水位変化が確認されている。



注) 赤字の値は、観測途中で欠測になったため、波高がその値以上である可能性があることを示す。

×は3月11日14時46分発生地震(M9.0)の震央位置である。

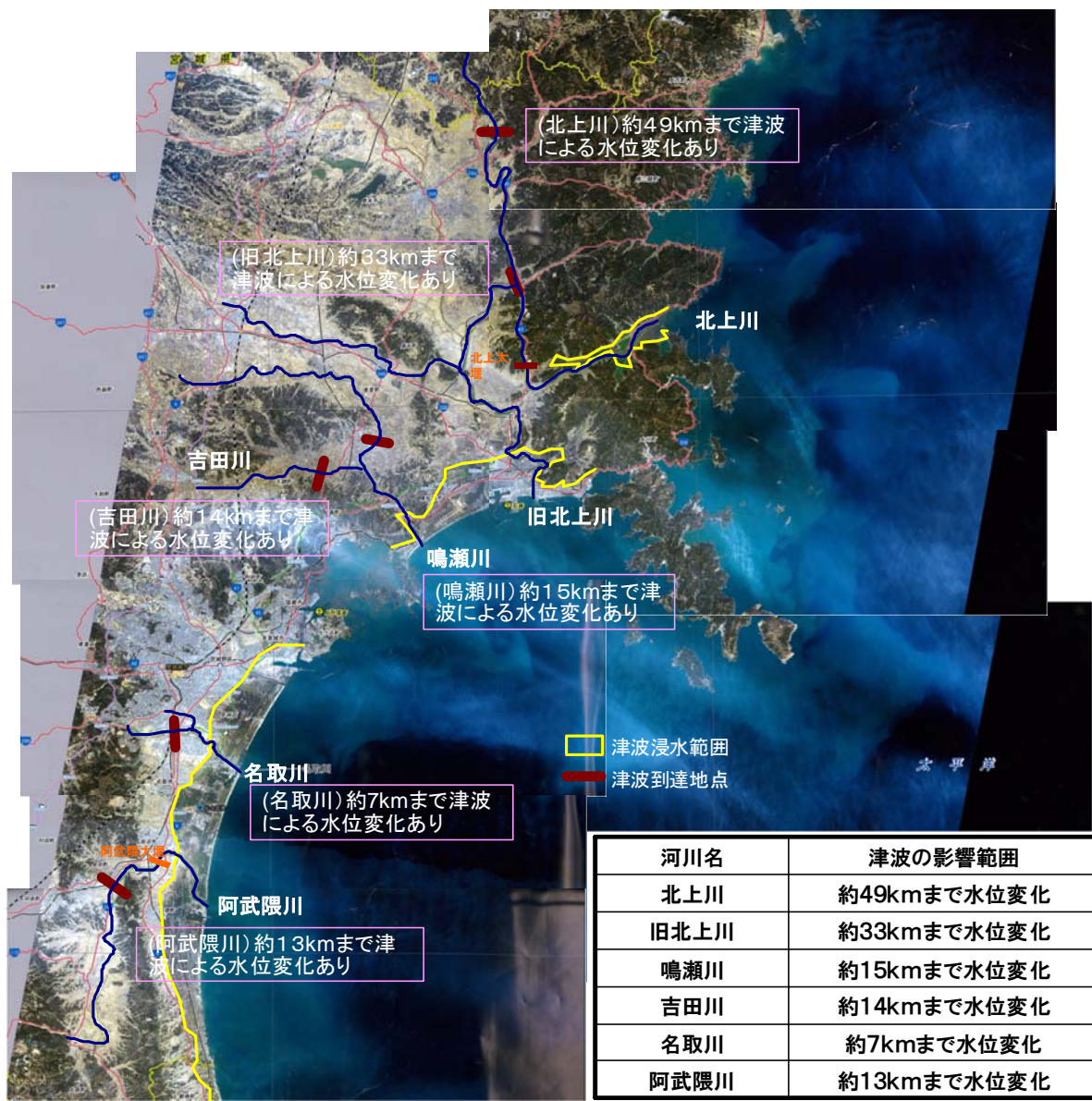


* : GPS 波浪計の計測結果

出典：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震津波の概要(第2報) 北海道根室半島から千葉県房総半島までの太平洋沿岸の津波高と浸水高

(2011年4月7日 一般財団法人 日本気象協会)

図-5(1) 各地の津波高と浸水高



図－5(2) 津波影響範囲（水位観測所データによる）

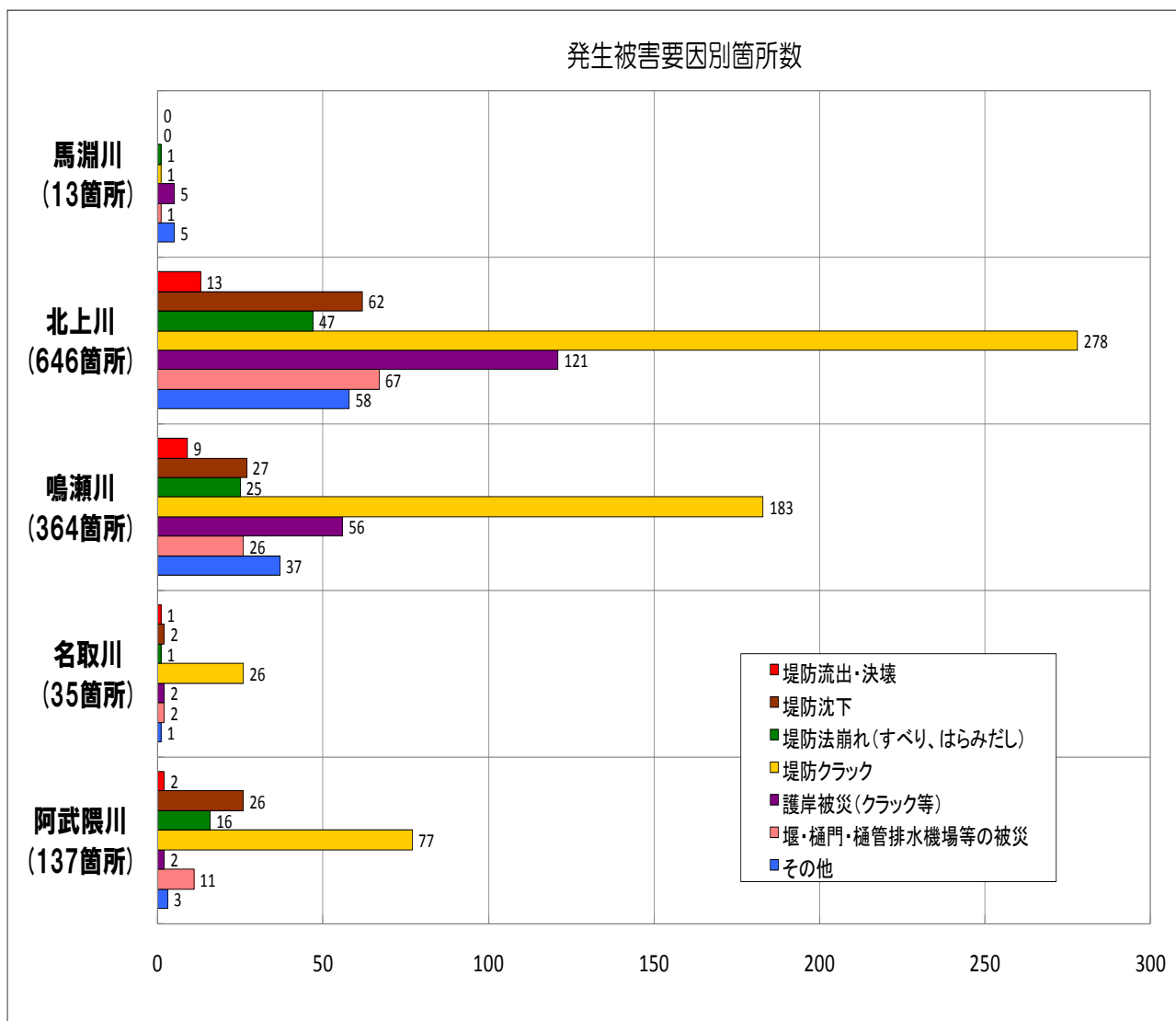
(2) 直轄河川管理施設における被災の概要

1) 東北地整管内の河川管理施設の被災

東北地方管内の直轄河川管理施設の地震及び津波による被災箇所数は、平成 23 年 4 月 26 日時点で 1195 箇所に入り、北上川、鳴瀬川、名取川及び阿武隈川など、宮城県内の河川に多く発生している。

図－6 に示した被災種別のうち、堤防流出・決壊は津波によるもので、北上川、鳴瀬川、名取川、阿武隈川で合計 25 箇所が発生している。

護岸被災、ならびに堰、樋門・樋管、排水機場等の被災を除く、堤防の被災は合計 773 箇所が発生し、堤防クラック、堤防沈下、堤防法崩れなどの形態の被災が多い。



※平成 23 年 4 月 26 日 17:00 時点 【国土交通省 東北地方整備局データ】

図－6 東北地方管内の直轄河川管理施設の被災概要

2) 緊急復旧

平成 23 年 3 月 14 日以降、特に被害の甚大な 29 箇所において緊急工事が実施されている（表－1）。

- 地震による被災堤防の内、大規模な被災 20 箇所（第 1 回検討会時に対象とした表－1 の○印の箇所）について、図－7 に従い被災形態を分類すると、VI 型が 19 箇所、V 型が 1 箇所であり、堤防全体が計画高水位以下に沈下変形した VI 型の被災がほとんどである。

表－1 緊急復旧工事の対象箇所（概要）

No	対象箇所	河川名	箇所	延長	市町村	被災内容	被災形態	備考
1		阿武隈川下流	(右) 0.0k-170m～ 0.0k+100m	L=270m (亘理大橋～ 河口)	亘理町 荒浜	堤防川裏洗掘		津波・ 越流
2	○	阿武隈川下流	(右) 22.4k+174m～ 22.6k+59m	L=269m	角田市 坂津田	兼用堤天端沈下 2m 以下	VI	
3	○	阿武隈川下流	(左) 28.6k+368m～ 29.2k+94m	L=330m L=560m	角田市 野田	川裏法面 小段クラック 幅 40cm、 深さ 3m、 堤防沈下 深さ 80cm、 川裏法面 小段クラック 幅 40cm、 深さ 3m	V	
4	○	阿武隈川下流	(右) 30.6k+40m～ 31.4k+140m	L=811m	角田市 枝野	天端沈下 50cm	VI	
5	○	阿武隈川下流	(右) 32.8k+103m～ 33.0k+170m	L=307m	丸森町 小斉	天端沈下 深さ 2m、 兼用堤天端沈下	VI	
6	○	阿武隈川上流	(右) 11.0k+110m～ 11.4k	L=290m (陥没延長 75m 沈下高 1.7m)	伊達市 梁川町	堤防クラック、法崩れ、 護岸も被災	VI	
7	○	鳴瀬川	(左) 11.3k+30m～ 11.5k+100m	L=220m	美里町 砂山	堤防法面崩落、 H=1.5m 程度	VI	
8	○	鳴瀬川	(右) 11.9k+30m～ 12.0k	L=70m	大崎市 鹿島台	堤防全体的に陥没	VI	
9	○	鳴瀬川	(左) 20.1k+130m～ 20.3k+40m	L=67m L=150m	美里町 和多田 沼 (練牛)	天端舗装沈下 H=1.2m、 堤防クラック H=1.0m、 W=0.3～0.5m	VI	
10	○	鳴瀬川	(左) 29.0k+20m～ 29.1k+280m	L=300m L 85m	大崎市 下中ノ 目	堤防沈下、 低水部捨石間隙開口	VI	
11	○	鳴瀬川	(左) 30.0k～ 30.5k+37m	L=320m	大崎市 下中ノ 目	堤防沈下	VI	
12		鳴瀬川	(右) 0.0k～ 0.4k+20m	L=420m	東松島市 野蒜	特殊堤破損及び半壊		津波・ 越流
13		鳴瀬川	(右) 29.7k+120m～ 30 1k	L=20m L=2 0m	大崎市 松山下 伊場野	堤防崩壊 H=5m、 堤防沈下 H=1.4m、 表法面縦断クラック H _{max} =1.4m		

No	対象箇所	河川名	箇所		延長	市町村	被災内容	被災形態	備考
14	○	吉田川	(左)	14.6k+70m～ 14.8k+20m	L=144m	大崎市 鹿島台	堤防沈下 護岸クラック	VI	
15	○	吉田川	(左)	15.2k+170m～ 15.4k+70m	L=98m L=98m L=60m	大崎市 鹿島台	堤防沈下, 堤体クラック, 高水敷沈下 H=0.8m, 護岸クラック	VI	
16		北上川 下流(新北)	(左)	-0.8k+20m～ 2.8k+192m	L=3,770m (月浜第二水 門取り付け部 まで決壊)	石巻市 月浜	堤防決壊		津波・ 越流
17		北上川 下流(新北)	(右)	3.8k～ 4.6k+16m	L=1,100m	石巻市 釜谷	堤防決壊 (津波の越波による。)		津波・ 越流
18		北上川 下流(新北)	(右)	1.0k		釜谷水 門	本体・ゲート部2門の うち1門流出		津波・ 越流
19		北上川 下流(新北)	(左)	1.8k+180m		月浜第 一水門	操作室流出、建屋浸水、 3号ゲート操作不可		津波・ 越流
20		北上川 下流(新北)	(左)	36.3k+50m		登米市 東和町 米谷 (鬼橋 排水樋 門)	函体クラック W=8cm, ※川表から40m 地点: 小段縦断クラック L=60m W=1cm, 門柱と管渠周 りにクラック発生, 鬼橋排水ビットの吐出 部のコンクリート剥離 (函体内部: 中央部 (20m～30m 地点)), H=50cm、W=10cm 程 度のクラックが全周に有 り, 鉄筋の露出, 左右岸側壁に H 10～ 12cm 程度の段差		樋門
21	○	江合川	(右)	14.0k+43m～ 14.6k+43m	=609m	涌谷町 桜町	堤防沈下 滑り	VI	
22	○	江合川	(左)	14.0k+50m～ 14.6k+100m	L=650m	涌谷町 上谷地	堤防沈下	VI	
23	○	江合川	(左)	20.8k+190m～ 21.0k+160m	L=170m	美里町 平針(下 流)	堤防沈下 川表・裏ク ラック	VI	
24	○	江合川	(左)	21.8k+10m～ 22.0k+30m	L=220m	美里町 平針(上 流)	堤防沈下 川裏法崩れ	VI	
25	○	江合川	(左)	25.9k+20m～ 26.9k	L= 78m	大崎市 刈尻	堤防沈下 川表・裏ク ラック	VI	
26	○	江合川	(右)	26.6k+115m～ 26.8k+120m	L=213m	大崎市 福沼	堤防沈下 天端クラッ ク	VI	
27	○	江合川	(左)	27.4k+60m～ 27.8k	L=309m	大崎市 刈尻	堤防沈下 H=2.4m、 W=3.25m	VI	
28		江合川	(右)	29.2k+100m～ 29.4k+60m	L=160m	大崎市 古川福 浦	天端クラック		
29	○	新江合 川	(右)	2.8k+25m～ 2.8k195m	=170m	大崎市 楡木	堤防沈下 裏法崩れ	VI	

堤防の被災形態分類（地震）

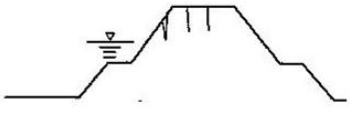

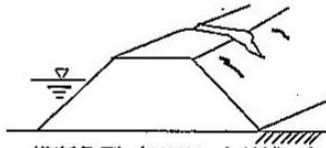
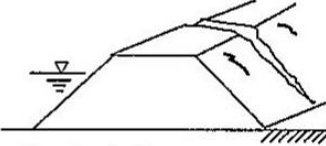

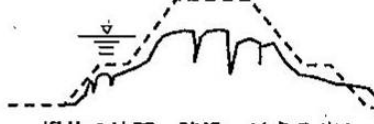

	被災形態	残存機能
I	 縦断亀裂（HWLより浅い）	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防天端全体に亀裂がある場合を除けば、堤防としての機能は概ね残っていると考えられる。 ・緊急性は低い。 ・切り返し等で緊急復旧できる。
II	 縦断亀裂（HWLより深い）	<ul style="list-style-type: none"> ・亀裂の幅や深さの規模、位置を勘案して残存機能を判断する。 ・緊急性はやや高い。 ・堤防機能に応じて緊急対策は異なる。（仮締切または裏腹付け等）
III	 横断亀裂（HWLより浅い）	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防天端全体に亀裂がある場合を除けば、堤防としての機能は概ね残っていると考えられる。 ・緊急性は低い。 ・切り返し等で緊急復旧できる。
IV	 横断亀裂（HWLより深い）	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防としての機能は残っていない。 ・仮締切りを行って復旧する。 ・緊急性は高い。（緊急復旧まで時間を要する。）
V	 堤体のすべり崩壊または、深い縦断亀裂、陥没	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防としての機能は残っていない。 ・仮締切りを行って復旧する。 ・緊急性は高い。（緊急復旧まで時間を要する。）
VI	 堤体の沈下、陥没、はらみ出し （変形がHWLより深い）	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防としての機能は残っていない。 ・仮締切りを行って復旧する。 ・緊急性は高い。（緊急復旧まで時間を要する。）
VI'	 堤体の沈下、陥没、はらみ出し （変形がHWLより浅い）	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防としての機能は残っている。 ・緊急性は低い。
G	堤防本体以外の被災 <ul style="list-style-type: none"> ・樋管樋門 ・高水敷の亀裂、沈下 ・低水護岸の変形 	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防機能には直接影響はないが、修復する必要がある。

図-7 緊急復旧箇所（津波被災を除く）における被災形態

震後対応の手引き（案）：国土交通省東北地方整備局、平成20年 に加筆

3) 地震と被災の概要のまとめ

今次の東北地方太平洋沖地震の災害要因としての特徴を列挙すれば以下の通りである。

- 地震規模 ($M=9.0$) が大きく、震源域が広い。
- 広域にわたり、地震動が作用した。
- 津波を伴う地震であり、襲来した津波の波高は極めて大きい。
- 地殻変動に起因する地盤沈降が発生した。
- 被災河川周辺の地震動の最大加速度は、堤防が位置する地盤と類似する第Ⅲ種地盤の古川、石巻でみた場合、河川堤防に被害をもたらした既往の被害地震に比べて格段に大きいものではなかった (図-2 (2)参照)。
- 地震動の継続時間は、河川堤防に被害をもたらした既往の被害地震に比べて極めて長い (約 3 倍の長さ)。
- 余震活動は活発で、余震規模、回数ともに既往の被害地震に比べて大きく、多い。
- 震後点検を必要とする震度 5 弱以上の余震は、3 月 11 日から 5 月 6 日までの間に 40 回発生し、本震で被災した箇所への損傷の拡大 (増破) が生じている。

この地震がもたらした直轄河川管理施設にまつわる被災の特徴を列挙すれば以下の通りである。

- 北は馬淵川、南は阿武隈川上流まで広い範囲に存在する直轄河川管理施設が被災した (被災箇所総数 1195 箇所)。
- 津波の遡上、越水により河川堤防、水門、堰が被災した (被災箇所総数 25 箇所)。
- 北上川下流、旧北上川、名取川、阿武隈川の下流部では地殻変動による地盤沈降のため浸水域が残っている。
- 堤防の被災箇所は上流 30 数 km 付近までの広範囲に分布し被災箇所総数は 773 箇所へのぼる。
- 緊急復旧を実施した特に甚大な被災を被った堤防の被災形態は V 型か VI 型のもので、堤防天端が沈下し、多くの区間で堤防機能が失われた。(堤防の被災形態と原因ならびに復旧方針に関する現時点の見解は第 2 章で詳述する。)
- 津波の影響区間では、堤防が決壊し流失した箇所があった。(堤防の被災と復旧に関する現時点の見解は第 2 章で記述する。)

2. 堤防被災の特徴と本復旧工法

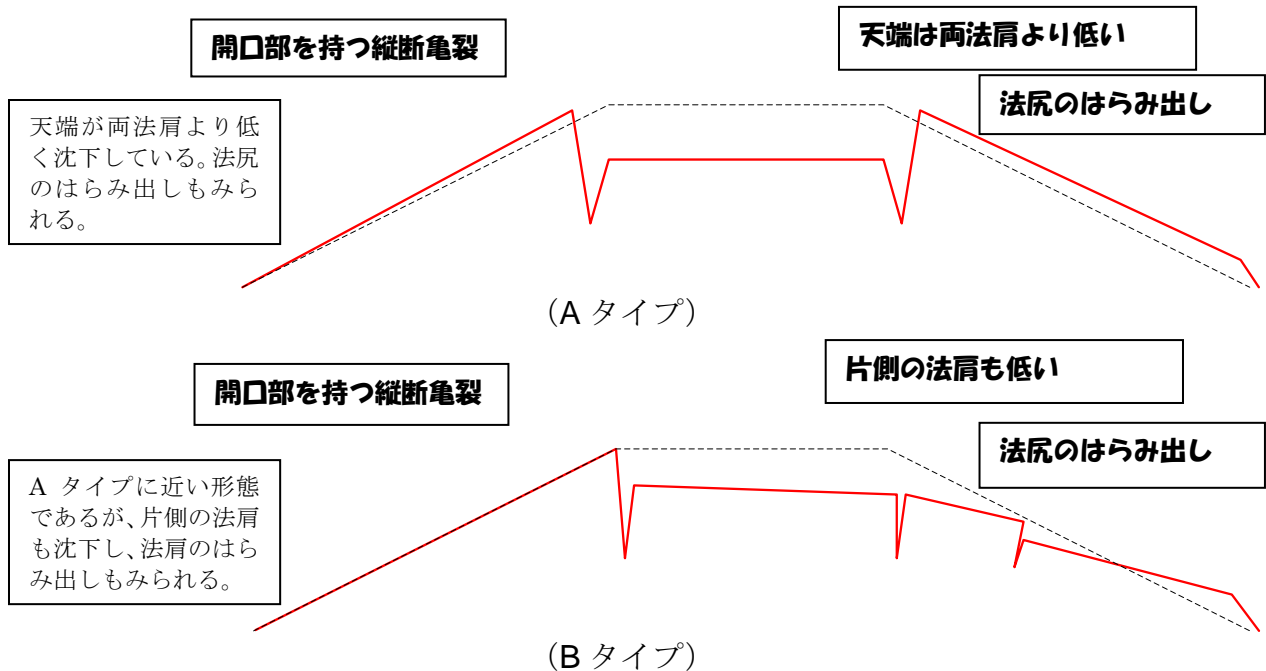
2. 1 地震被災

(1) 地震による堤防被災の特徴

1) 堤防被災の形態

今次の地震で被災し緊急復旧工事を実施した 20 箇所の被災形態の特徴は、以下のよう
に集約できる。

- ・ 法肩に幅の広い開口部を持つ縦断亀裂（多くはほぼ鉛直の亀裂面）が生じ、天端が沈下している。法面にも縦断亀裂を伴うことが多い。（法肩に幅の広い開口亀裂が生じたということは、法面頂部が水平方向に外側に広がったことを示している。）
- ・ 沈下した堤防天端部分は、残存した法肩の標高より低くなっているものが少なくない。（既往地震時の被災形態では、天端部分が相対的に法肩より低くなる陥没型の事例は稀にしか経験されていない。今次地震による被災形態の特徴の一つである。）
- ・ 堤外側、堤内側の両方の法肩が、沈下した天端より高い場合と、片側の法肩だけが低い場合がある。
- ・ 法面下部（法尻）がはらみだしている。（「河川堤防等被害状況：現地調査速報（その1）：国土技術政策総合研究所 河川研究室」、「河川堤防被災状況調査報告：独立行政法人土木研究所 土質・振動チーム」 参照）
- ・ 法尻のはらみ出しが極端に大きくなった場合には、変形した堤体は複数の亀裂によって分断され、土塊と土塊の間には広い開口が生じている。
- ・ 法尻や、亀裂に噴砂の痕跡が残されているが、周辺地盤には噴砂の痕跡が見られないことが多い。
- ・ 以上の被災形態の特徴を模式的に示すと、変形形態は下図の 3 タイプに類型化できる。

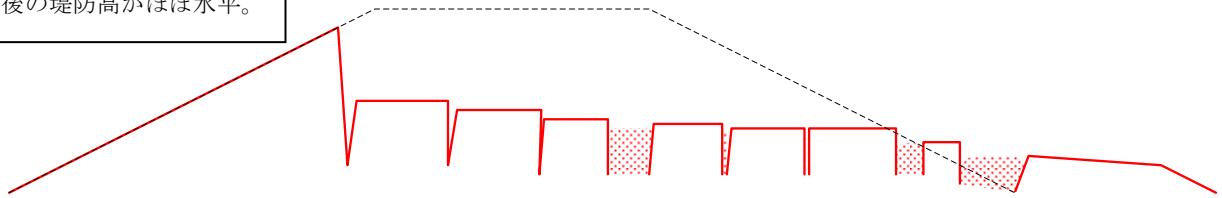


開口部を持つ縦断亀裂

堤体が亀裂によってブロック化（分断）され、法面も流動的な側方移動が著しい。変形後の堤防高がほぼ水平。

法面部の流動的な側方移動

堤体は亀裂によって分断されている



(C タイプ)

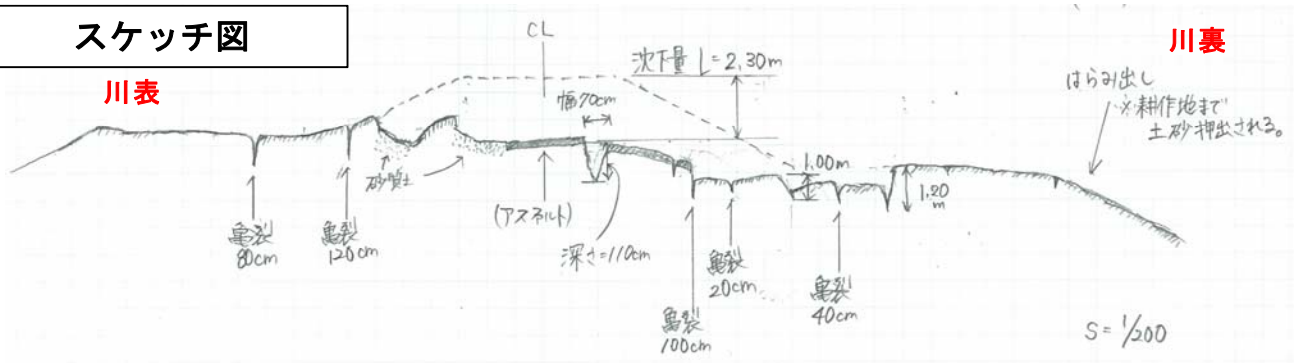
図－7(1) 堤防の被災形態（堤防変状タイプ）

図－7(2) から図－7(10) に示す変形を集約して 9 箇所の変形の特徴を模式化した。

法肩部の深い亀裂はほぼ鉛直な亀裂面を有し、堤体が水平方向に引張り力を受けたことを思わせる。9 箇所のほとんどの場合、堤体の亀裂の底部や法尻に噴砂の痕跡が認められる。

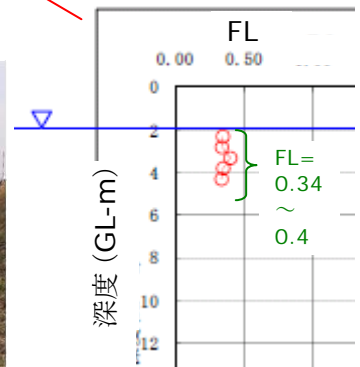
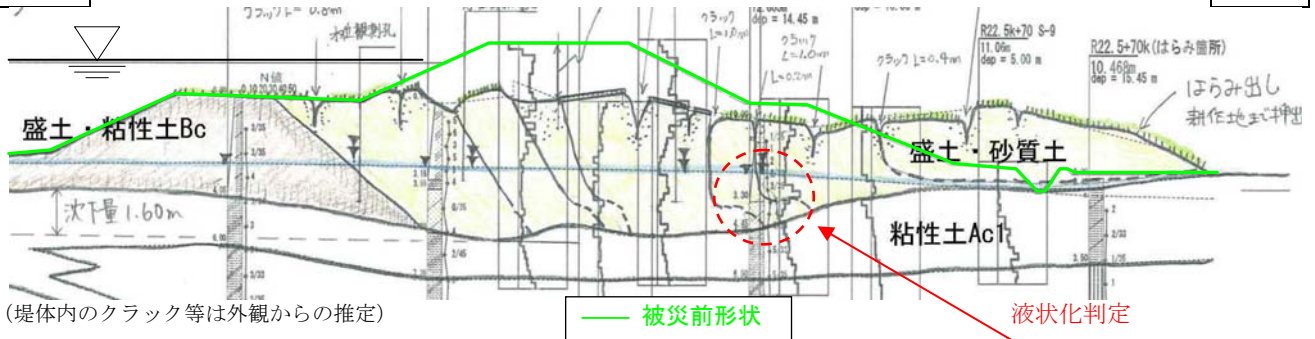
- ・ 変形状況を、現時点まで得られたボーリング調査結果とともに以下に示す。
- ・ 以下の図を一重線の枠にした理由は、地表形状は計測事実であるものの、堤体内の流動的変形をした部分は今後のさらなる地盤調査や開削調査によって明らかにすべきものであり、現時点での一つの仮説としての側面を有するデータだからである。

スケッチ図



堤外側

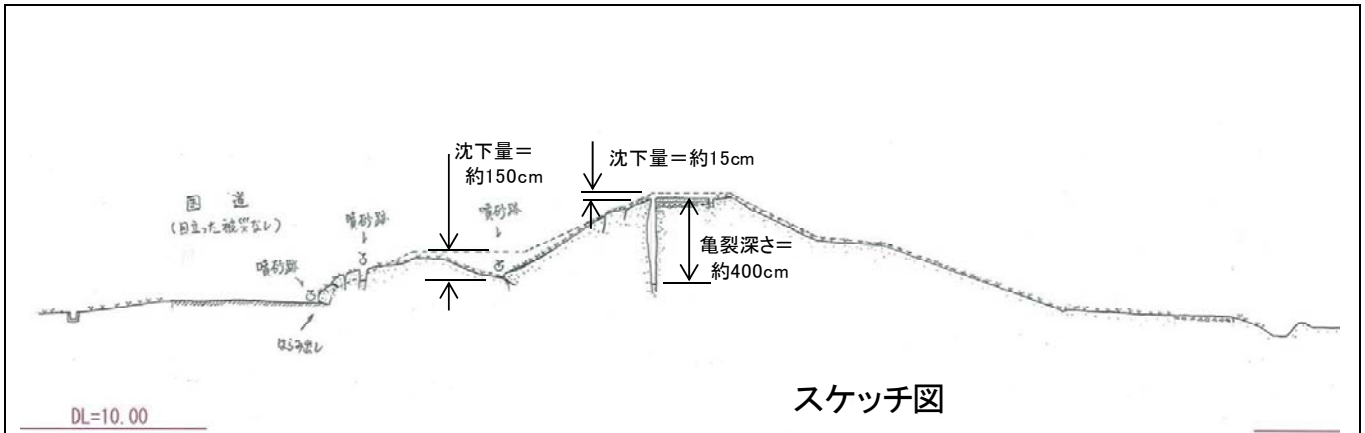
堤内側



- ◆ 堤防変状
 - ・ 川裏側への著しい変形（川表側への変形はほとんど見られない）
- ◆ 噴砂
 - ・ 堤体クラック内で確認
- ◆ 地下水位
 - ・ 堤体土層内に地下水位を確認
- ◆ 周辺状況
 - ・ 堤内地側堤脚水路を越えて土砂が流出
- ◆ 堤体土
 - ・ 細粒分含有率 $FC \leq 35\%$ 、 $D50 \leq 10\text{mm}$ 、 $D10 \leq 1\text{mm}$ を満たす

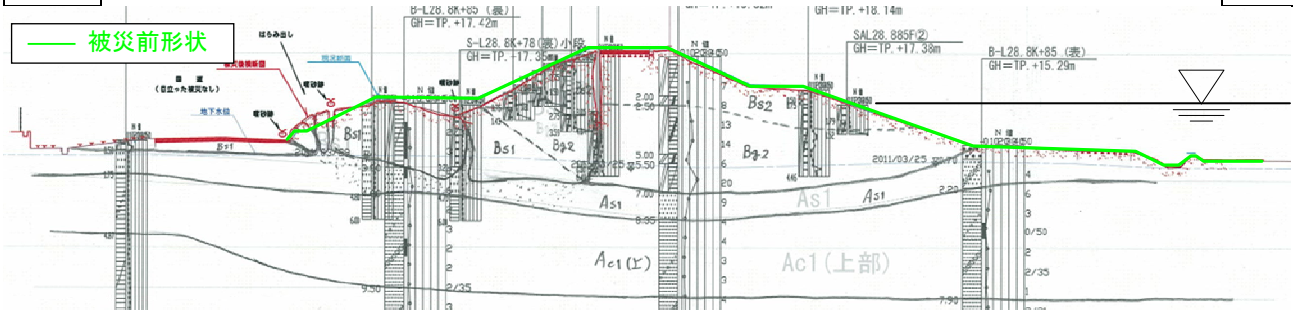
図-7(2) 坂津田地区：阿武隈川下流 右岸 22.4k+174m ~ 22.6k+59m 【Cタイプ】

写真は下流側から上流側に向かって撮影している。したがって上の図と左右逆になっている。



堤内側

堤外側



- ◆堤防変状
 - ・川裏側への変形（川表側への変形はほとんど見られない）
- ◆噴砂
 - ・川裏小段尻や川裏法尻付近で確認
- ◆地下水位
 - ・堤体土層内に地下水位を確認
- ◆周辺状況
 - ・周辺構造物での変状はほとんど見られない
- ◆堤体土
 - ・細粒分含有率 $FC \leq 35\%$ 、 $D50 \leq 10\text{mm}$ 、 $D10 \leq 1\text{mm}$ を満たす層が存在する

図-7(3) 野田地区：阿武隈川下流 左岸 28.6k+368m ~ 29.0k+94m 【Bタイプ】

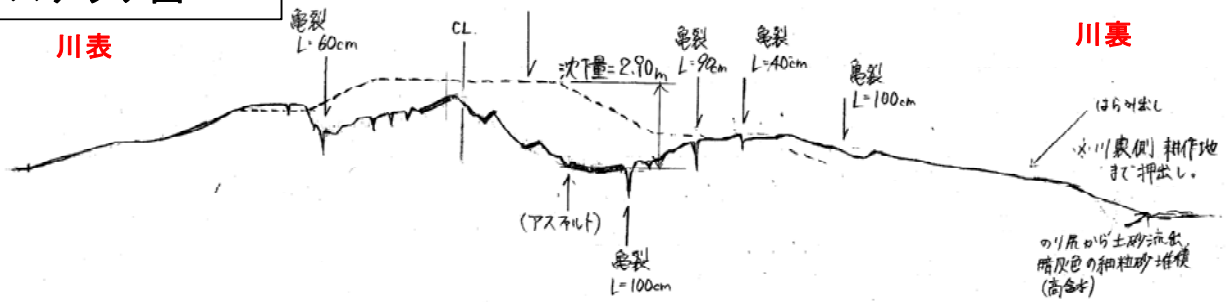
スケッチ図

川表

(被災前断面)

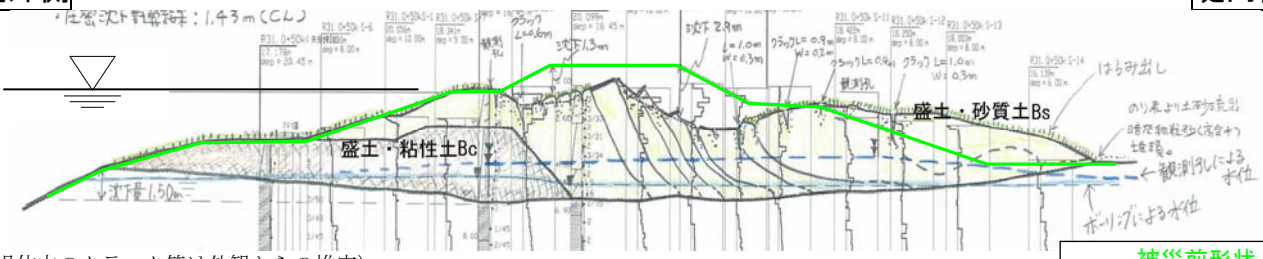
(川裏)

川裏



堤外側

堤内側



(堤体内のクラック等は外観からの推定)

— 被災前形状

右岸30.8k付近: 縦断クラック発生
深さは1.00m程度。

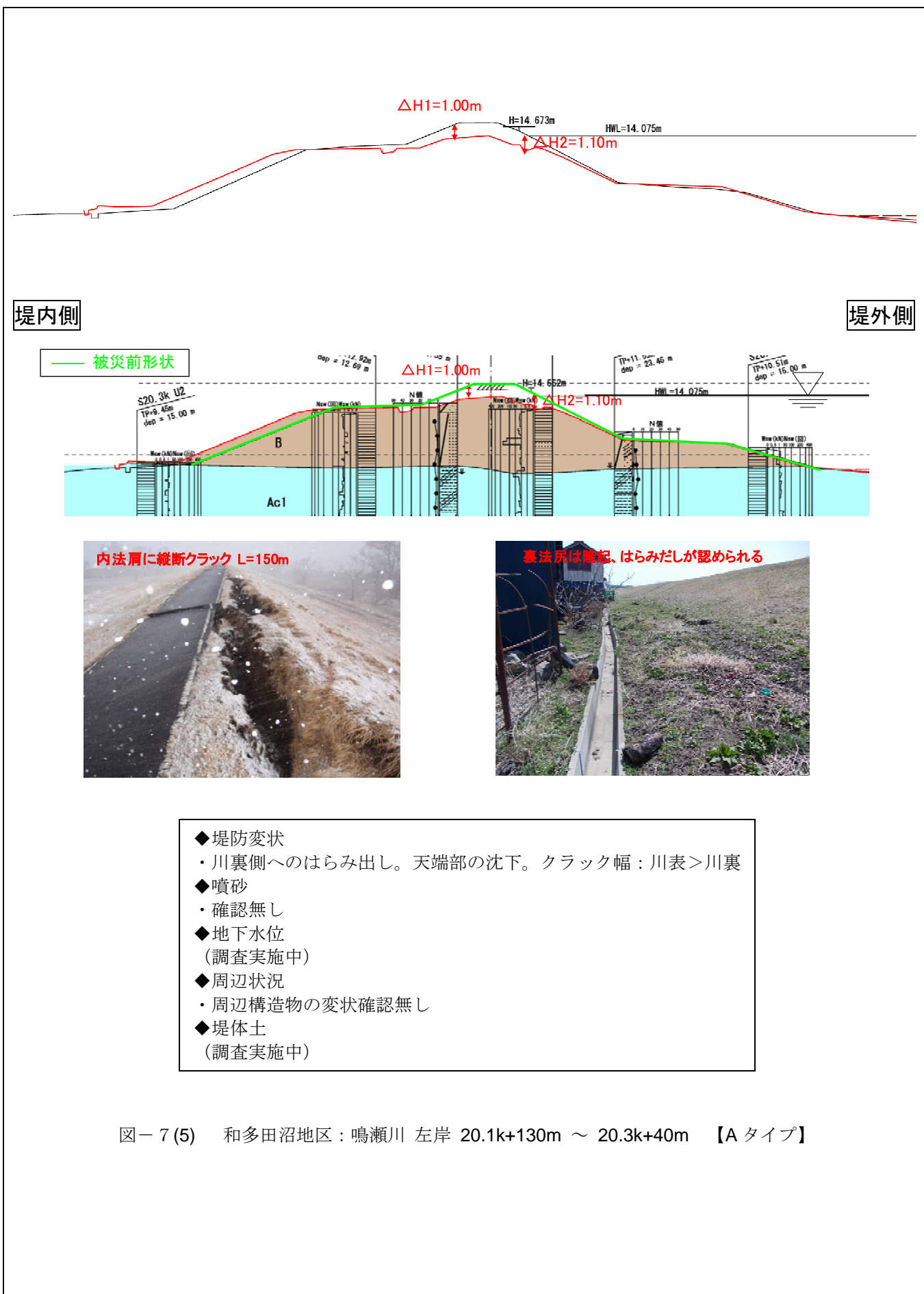


右岸31.0k付近: 天端縦断クラック
堤体沈下量=2.30m。



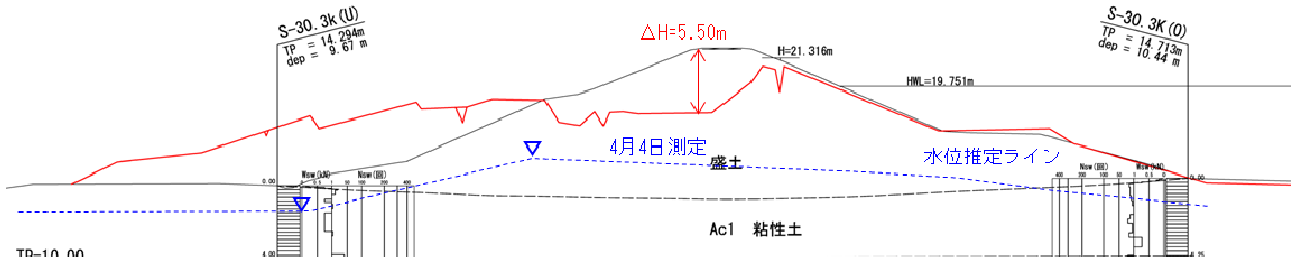
- ◆ 堤防変状
 - ・ 川裏側への著しい変形 (川表側への変形はほとんど見られない)
- ◆ 噴砂
 - ・ 川裏法尻付近及び堤体クラック内で確認
- ◆ 地下水位
 - ・ 堤体土層内に地下水位を確認
- ◆ 周辺状況
 - ・ 堤内地側堤脚水路に土塊が乗り上げ
- ◆ 堤体土
 - ・ 細粒分含有率 $FC \leq 35\%$ 、 $D50 \leq 10\text{mm}$ を満たす層が存在する

図-7(4) 枝野地区: 阿武隈川下流 右岸 30.6k+34m ~ 31.4k+160m 【Cタイプ】



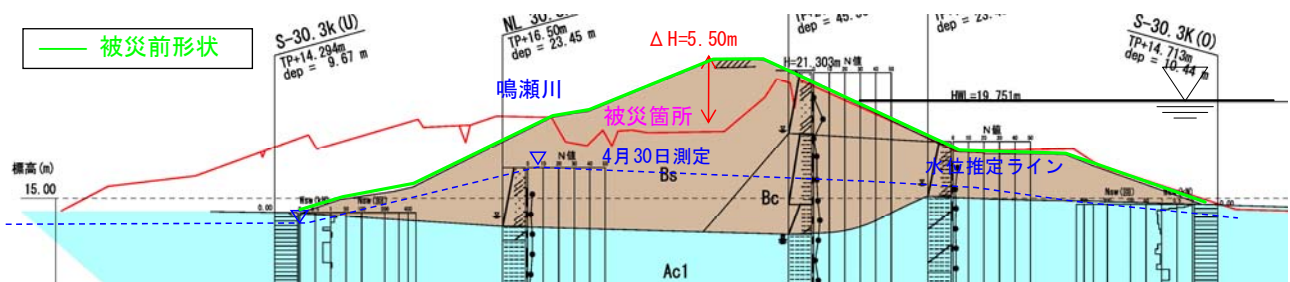
- ◆堤防変状
 - ・川裏側へのはらみ出し。天端部の沈下。クラック幅：川表>川裏
- ◆噴砂
 - ・確認無し
- ◆地下水位
 - (調査実施中)
- ◆周辺状況
 - ・周辺構造物の変状確認無し
- ◆堤体土
 - (調査実施中)

図-7(5) 和多田沼地区：鳴瀬川 左岸 20.1k+130m ~ 20.3k+40m 【Aタイプ】



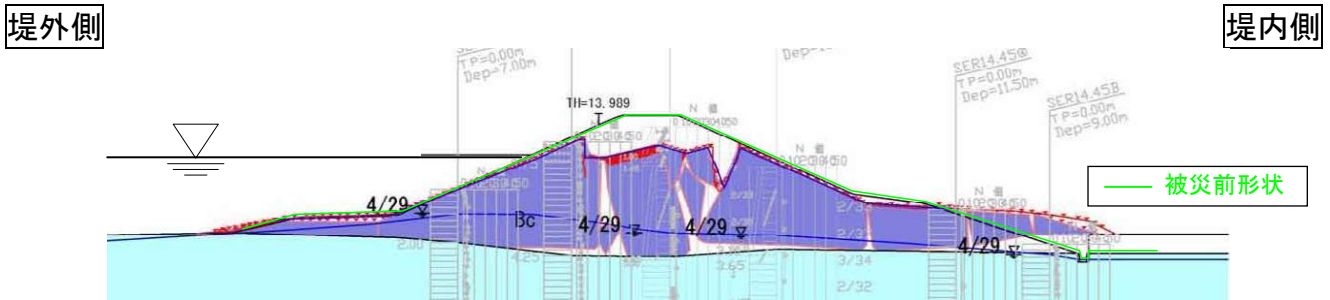
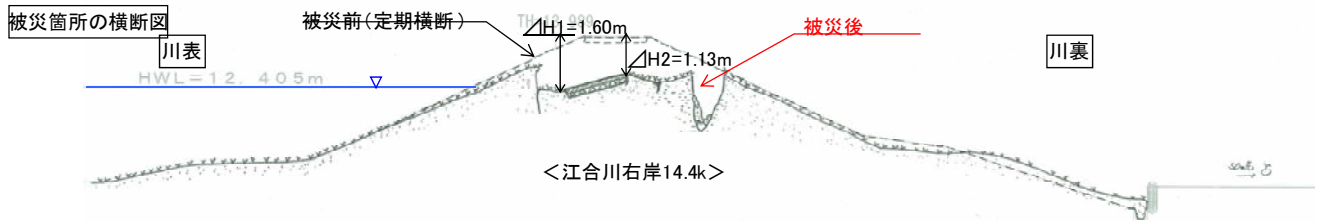
堤内側

堤外側



- ◆堤防変状
 - ・川裏側への著しいはらみ出し。天端部の沈下。川表側はクラック程度の変形
- ◆噴砂
 - ・堤体クラック内（水たまり有り）及び川裏法尻で確認
- ◆地下水位
 - ・堤体土層内に地下水位を確認
- ◆周辺状況
 - ・裏法尻付近には日常的に湿潤状態（ヒアリング）
- ◆堤体土
 - ・土粒子の比重は 2.56～2.6、塑性指数 I_p は 15～32 の範囲にある

図－7(6) 下中ノ目上流地区：鳴瀬川 左岸 30.0k ～ 30.5k+37m 【Cタイプ】



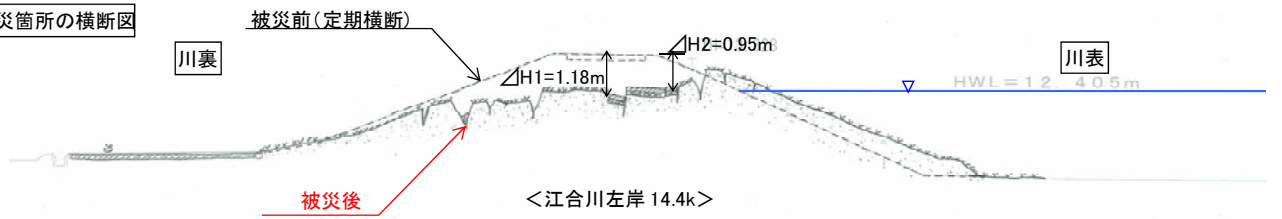
(堤体内のクラック等は外観からの推定)



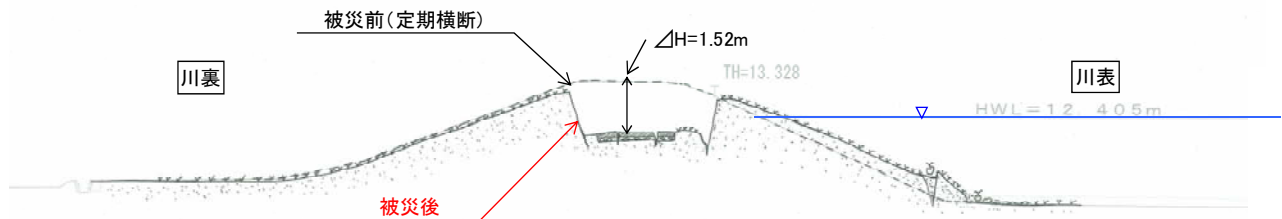
- ◆ 堤防変状
 - ・ 天端部分が凹状に陥没 (川表川裏両側への法尻のはらみ出し)
- ◆ 噴砂
 - ・ 高水敷及び堤防から 50m程度離れた堤内地で確認
- ◆ 地下水位
 - ・ 堤体土層内に地下水位を確認
- ◆ 周辺状況
 - ・ 14.4k 付近では川裏法面が滑動
- ◆ 堤体土
 - ・ シルト主体。部分的に砂を含む。

図-7(7) 中島乙(桜町)地区: 江合川 右岸 14.0k+43m ~ 14.6k+43m 【Aタイプ】

被災箇所横断面図



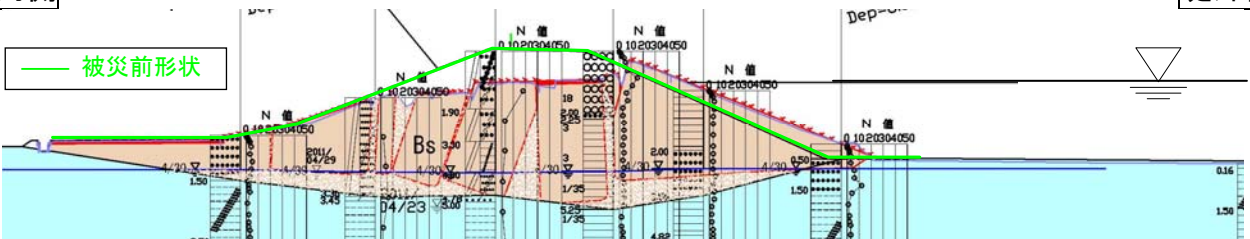
<江合川左岸 14.4k>



<江合川左岸 14.4k+36m>

堤内側

堤外側



(堤体内のクラック等は外観からの推定)

両法肩に縦断クラック、天端が陥没



表法尻がはらみだし、縦断クラックからは暗灰色の噴砂が見られる。



◆堤防変状

- ・川表川裏両側への変形 (川裏側への変状が甚大)

◆噴砂

- ・川表法尻部クラック内及び川裏側道クラック内で確認

◆地下水位

- ・堤体土層内に地下水位を確認

◆周辺状況

- ・堤内地側側道が堤防で押し出されている。隣接民地のブロック塀が崩壊

◆堤体土

- ・砂主体。部分的にシルトを含む。

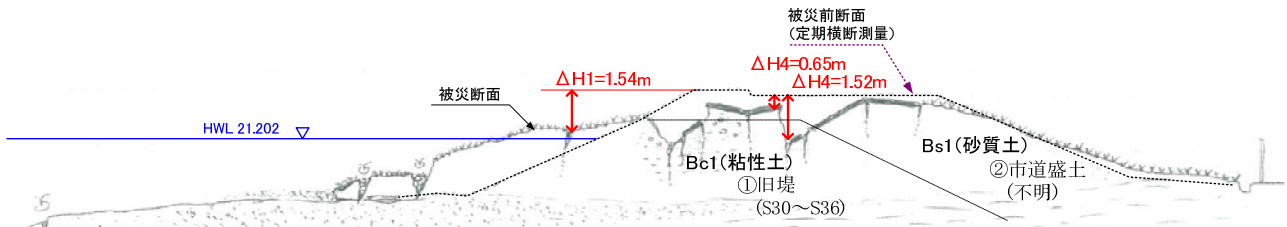
図-7(8) 上谷地地区：江合川 左岸 14.0k+50m ~ 14.6k+100m 【A,Bタイプ】

被災箇所の横断面

川表

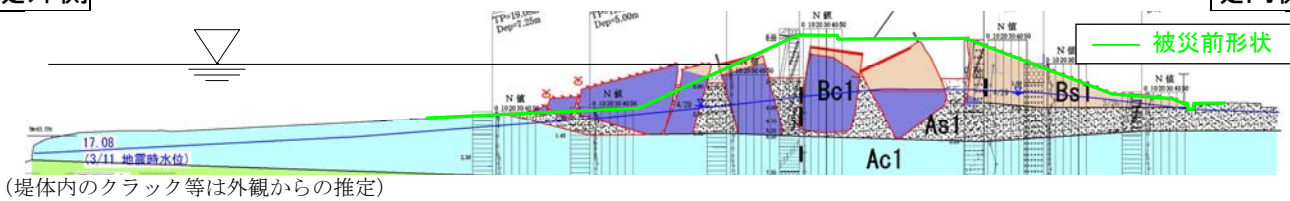
<江合川右岸26.8k+50>

川裏



堤外側

堤内側



天端には深度2.0m以上のクラック
(裏法は形状を保っている)



亀裂内の噴砂

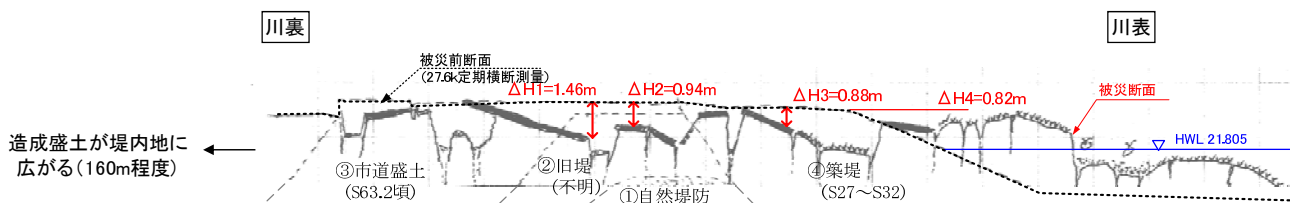


- ◆ 堤防変状
 - ・ 川表側への変形 (川裏側は若干の沈下)
- ◆ 噴砂
 - ・ 川表はらみ出し部内クラック内で確認
- ◆ 地下水位
 - ・ 堤体土層内に地下水位を確認
- ◆ 周辺状況
 - ・ 堤内地が堤内地側に傾斜
- ◆ 堤体土
 - ・ 細粒分含有率 $FC > 35\%$ かつ $Ip \leq 15$ 、 $D50 \leq 10\text{mm}$ 、 $D10 \leq 1\text{mm}$ を満たす

図-7(9) 福沼地区：江合川 右岸 26.6k+115m ~ 26.8k+120m 【Cタイプ】

被災箇所横断面

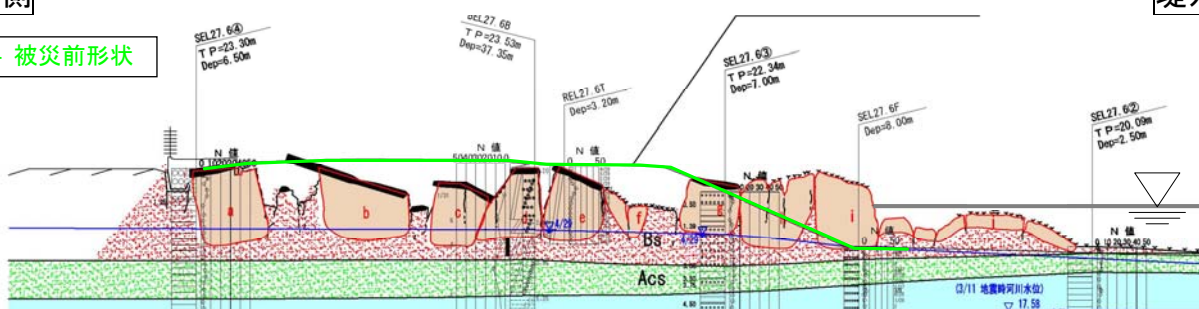
<江合川左岸27.6k>



堤内側

堤外側

— 被災前形状



(堤体内のクラック等は外観からの推定)

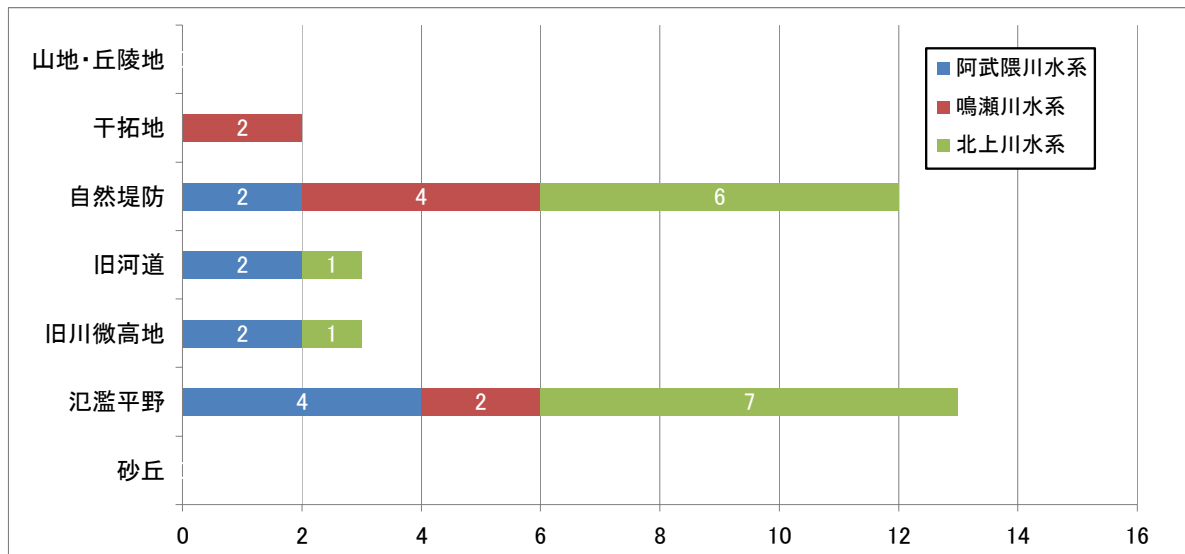


- ◆ 堤防変状
 - ・ 川表側への著しい変形 (川裏側への変形はほとんど見られない)
- ◆ 噴砂
 - ・ 川表法尻付近及び法面クラック内で確認
- ◆ 地下水位
 - ・ 堤体土層内に地下水位を確認
- ◆ 周辺状況
 - ・ 堤内地が堤外地側に傾斜
- ◆ 堤体土
 - ・ 細粒分含有率 $FC \leq 35\%$ 、 $D50 \leq 10\text{mm}$ 、 $D10 \leq 1\text{mm}$ を満たす

図-7(10) 湧尻上流地区：江合川 左岸 27.4k+60m ~ 27.8k 【Cタイプ】

2) 堤防被災箇所と微地形

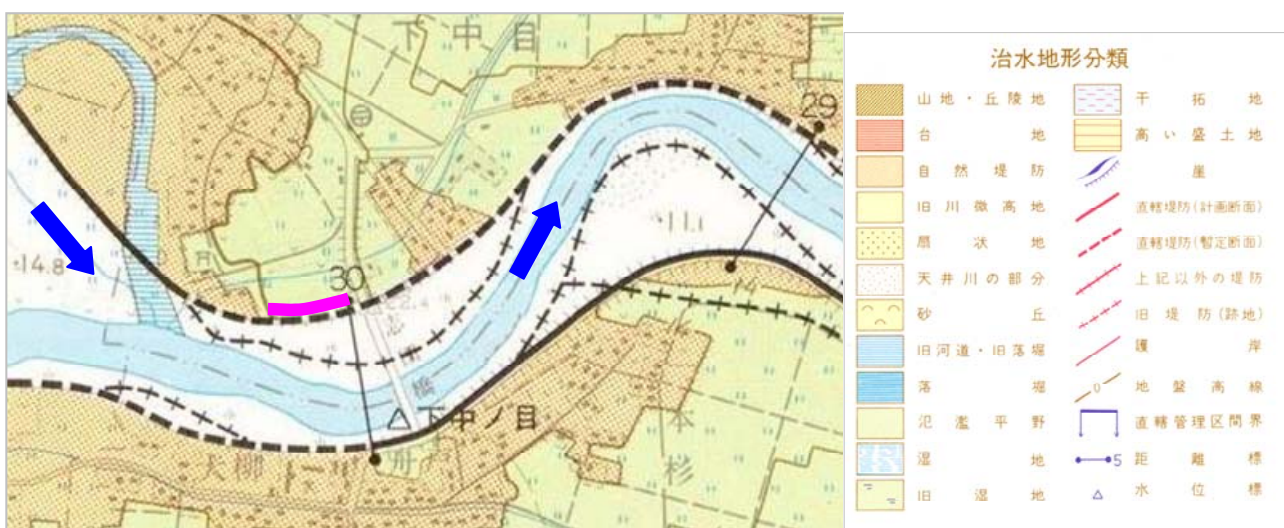
- ・大規模な被災箇所（20箇所）と基礎地盤微地形の関係をみると、氾濫平野及び自然堤防での被災箇所が多く、過去の地震で被害が多く見られた旧河道での被災が少ない。
- ・氾濫平野の表層は軟弱粘性土層からなることが多く、現時点までにボーリング調査結果の得られた9箇所の被災箇所のうち、基礎地盤表層が砂質土層の箇所が3箇所、粘性土層の箇所が6箇所である。



※被災箇所で複数の微地形に跨る場合は、それぞれカウントしている

図－8 堤防被災箇所における基礎地盤微地形

【参考】治水地形分類図（鳴瀬川左岸 30.0k～30.5k+37m（下中ノ目上流地区）付近）



3) 堤体の土質と地下水位

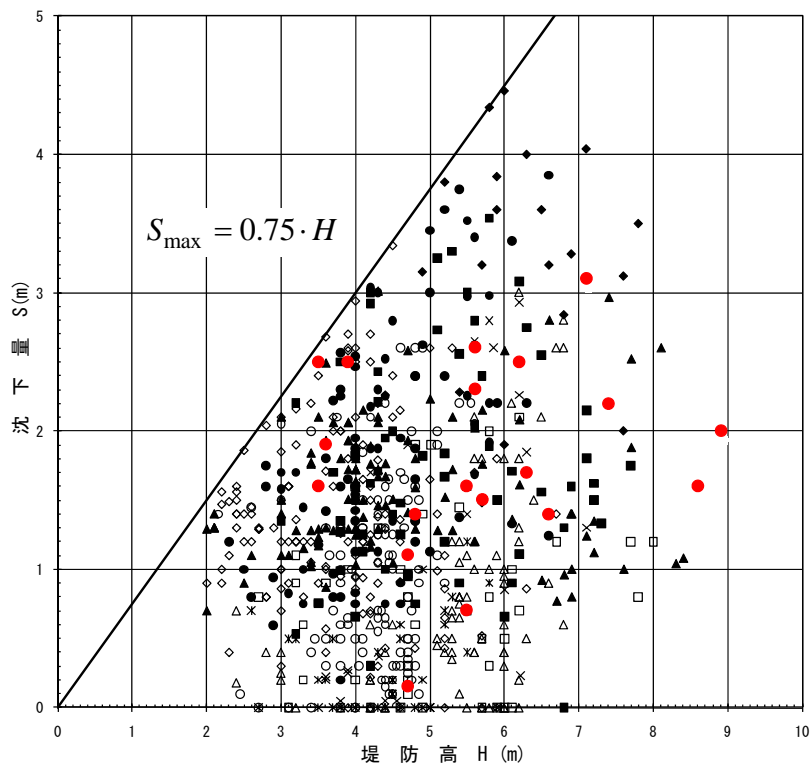
全ての箇所では堤防の土質調査が終了していないが、図－7(2)～(10)に示した9箇所のボーリング調査及び堤体内地下水位観測結果より、下記の事項が分かる。

- ・江合川 中島乙（桜町）地区及び調査中の鳴瀬川 和多田沼地区を除く7箇所では、堤体下部の土質は砂質土が多くを占めており、N値は10程度以下で緩い状態である。
- ・また、地下水位は堤体内に形成され、緩い砂質土が飽和している状態である。

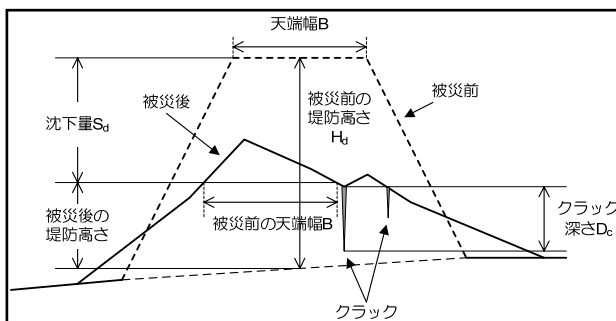
なお、特に地震被災によって大きな堤体変形が生じたために、堤体の残存機能の劣化が懸念される箇所においては、代表的な堤防断面を選定し、水位計を設置して堤体内地下水位を把握することとする。

4) 堤防被災箇所の天端沈下量

- ・被災箇所の堤防（堤高＝3.5～9m）について、被災前の堤防高と沈下量との関係を過去の事例と比較すると、大規模に沈下しても堤防高の25%は残留していることが分かる。
- ・天端沈下量に対する側方への堤体の変動量（断面積の変化量）を調べてみると、Cタイプの被災形態の場合に堤体の変動量が大きい。このことは残存した堤体が全体としては密度が小さくなりゆるんだことを示唆している。
- ・堤防の沈下・陥没等による減少量と側方変動量とを比較してみると、ほぼ同等となる事例が多い傾向を示している。

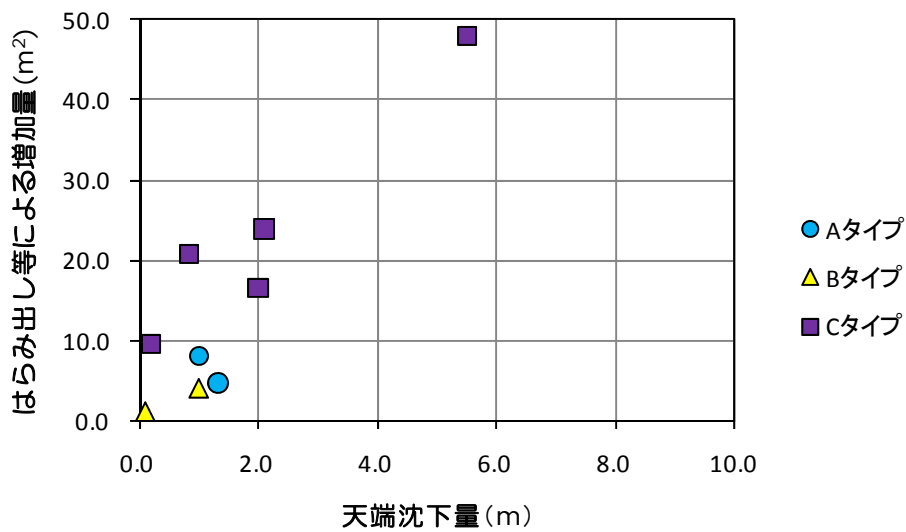


●東北地方整備局 緊急災申請箇所
平成23年4月12日時点の速報値

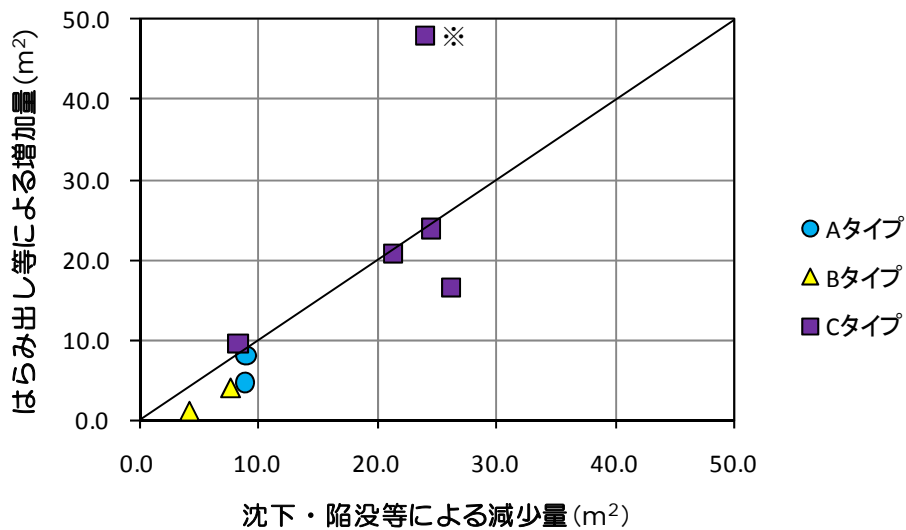


- ◆濃尾地震（長良川、揖斐川等）
- 関東大地震（江戸川、富士川等）
- 福井地震（九頭竜川、大聖寺川等）
- ▲十勝沖地震（新釧路川、十勝川等）
- ◇新潟地震（阿賀野川、信濃川等）
- 宮城県沖地震（北上川、名取川等）
- ×日本海中部地震（岩木川、米代川等）
- △釧路沖地震（釧路川）
- 北海道南西沖地震（後志利別川）
- ×兵庫県南部地震（淀川）

図-9 堤防高と沈下量の関係



図－10(1) 被災堤防の天端沈下量と側方変動量との関係



図－10(2) 被災堤防の沈下・陥没等による減少量と側方変動量との関係

地区名	被災形態 (堤防変状タイプ)	天端沈下量(m)	沈下・陥没等による減少量(m²)	はらみ出し等による増加量(m²)
阿武隈川下流 坂津田地区	C	2.1	24.5	23.9
阿武隈川下流 野田地区	B	0.1	4.3	1.2
阿武隈川下流 枝野地区	C	2.0	26.2	16.6
鳴瀬川 和多田沼地区	A	1.0	9.0	8.0
鳴瀬川 下中ノ目地区	C	5.5	24.0	48.0
江合川 中島乙(桜町)地区	A	1.3	8.9	4.7
江合川 上谷地地区	B	1.0	7.7	4.1
江合川 福沼地区	C	0.2	8.3	9.6
江合川 溯尻上流地区	C	0.8	21.3	20.7

※ 沈下陥没による減少量に対し、はらみ出しによる増加量が多い箇所は、空隙等の面積を適切に計測できていない可能性があるため、引き続き精査を行う。

図-7 (堤体の分断化) や図-10 (堤体断面積の変動量) は、残存堤防の機能の劣化を思わせる。劣化程度を計測できる方法はない。そこで、被災の有無による貫入抵抗の比較を試みた。

被災の有無箇所における強度の比較

- 被災箇所 (仮復旧後) と近傍の無被災箇所で、堤防天端から実施したサウンディング結果より、土質分類がほぼ同様と考えられる土を対象に換算 N 値で両者を比較してみると、沈下・陥没したような被災堤防で残存している土は (残存堤防)、無被災箇所に比べ強度が低下していることが分かる。(元々の N 値が低かったことも考えられる。他箇所での整理を引き続き行う。)

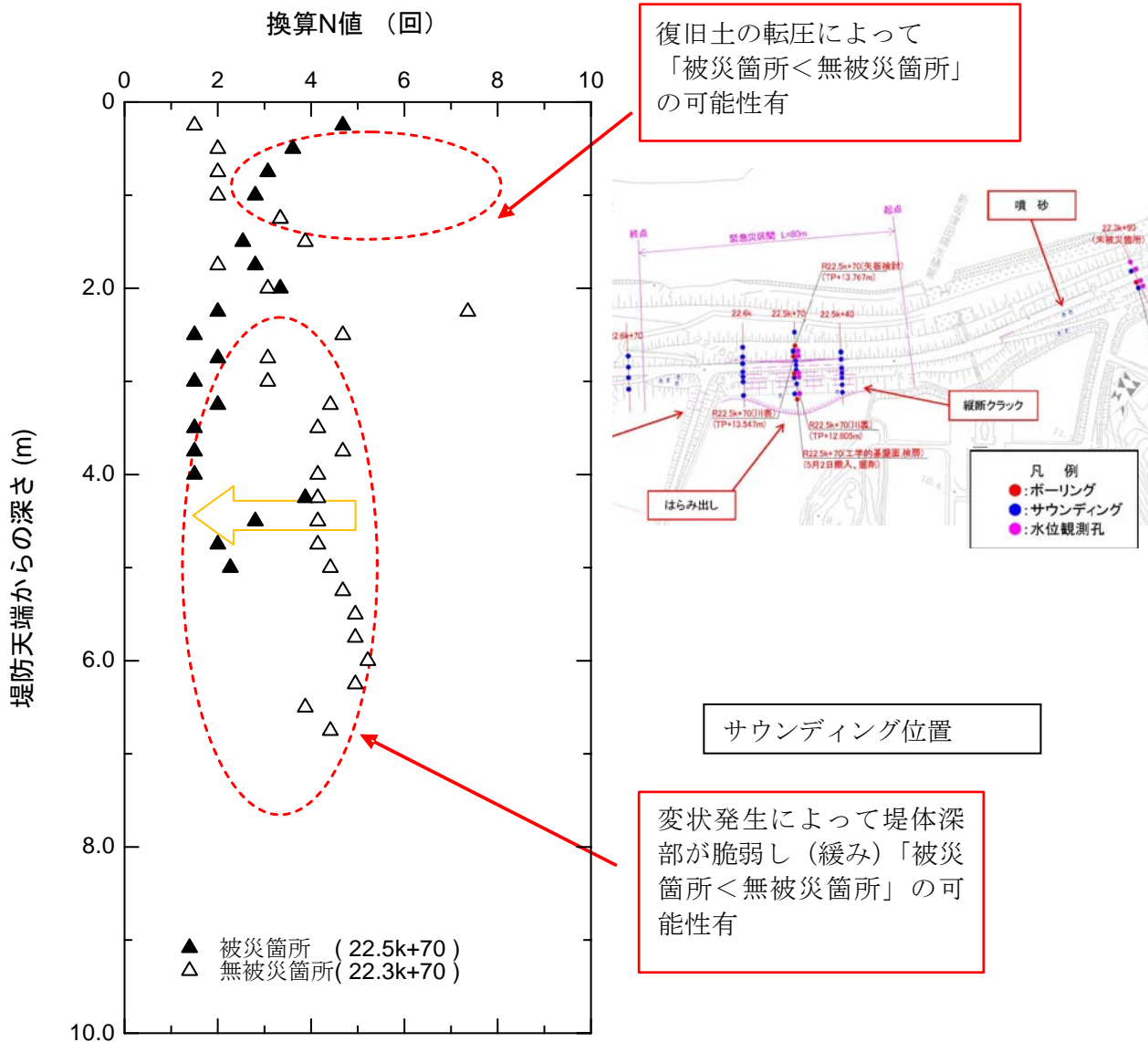


図-11 被災堤防と無被災堤防のサウンディング結果比較 (阿武隈川 右岸 坂津田地区)

5) 既往地震による被災箇所状況

平成 15 年 7 月 26 日発生 of 宮城県北部地震により被災を受けた鳴瀬川堤防においては、被災の大きな箇所の本復旧工法として、堤体全面切り返し+地盤改良+護岸+ドレーン工を組み合わせて実施した。

今回の地震時においては、復旧箇所における被災は確認されていない。

【対策工部の地震後の状況とH15の地震時の被災状況】



今回の地震後の状況(対策工部に変状なし)

【H15地震時の被災状況】

- ・堤防天端の段差40~80cm、法尻は川裏側に2~3m変位
- ・亀裂は幅40~80cm、深さ40~180cm、法面にも多数の亀裂。
- ・13.4k付近の法尻側道~民家にかけて地盤の盛り上りが発生
- ・13.5k付近川裏側の樹木が川側に傾斜
- ・13.4k付近の家屋も川側に傾斜
- ・被災箇所周辺では噴砂は確認されていないが、13.4kから200m下流では川裏の民家で噴砂を確認
- ・13.5kの開削断面では砂脈やすべり破壊線を確認



H15地震後の被災状況(天端沈下・亀裂)



H15地震後の被災状況(川裏法尻隆起変形)



H15地震後の被災状況(民家の傾斜)

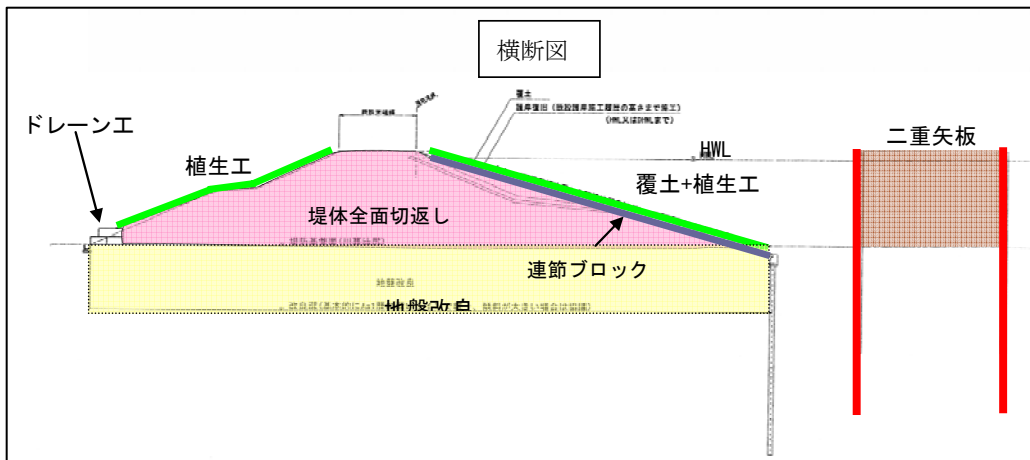
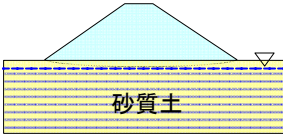
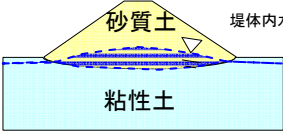


図-12 平成 15 年宮城県北部地震対策箇所の状況 (鳴瀬川)

6) 堤防被災の主要因と変形過程の推定

- ・ 大規模被災箇所 20 箇所の天端沈下量は最大 3m を超え、堤体形状が大きく変形している。
- ・ 大規模被災箇所 20 箇所の内、14 箇所ではクラック及び法尻付近で噴砂、噴水・湧水による水たまりが確認されている。
- ・ 周辺地盤での噴砂の痕跡より、基礎地盤で液状化が起こった可能性の高い箇所は、大規模被災箇所 20 箇所のうち一箇所（鳴瀬川木間塚地区）だけである。
- ・ また、噴砂が確認されていない箇所においても、側方にはらみだした堤体は湿潤な状況であった。（吉田川大迫上志田下流地区）
- ・ 今回の地震時においては、平成 15 年 7 月 26 日発生 of 宮城県北部地震により被災を受けた鳴瀬川堤防の復旧箇所における被災は確認されていない。
- ・ 被災後の地盤調査結果より、被災した多くの箇所（大規模被災箇所 20 箇所のうちボーリング調査結果が得られている 9 箇所中 6 箇所）の基礎地盤表層は粘性土である。また、基礎地盤表層が砂層の 3 箇所においても砂層は薄く、その下部は粘性土である。
- ・ なお、上記 9 箇所中 7 箇所の堤体下部には緩い砂質土が存在し、その一部は地下水位以下で飽和している。
- ・ 全ての箇所での地盤の土質調査が終了していない現時点では液状化したと推定される砂質土層の厚さや、深さは全ての箇所では特定できていないが、現時点で $k=0.4$ 程度の水平震度を用いて液状化判定を行った結果（阿武隈川坂津田地区）、堤体下部に液状化の可能性が高い層が存在している（ $FL=0.34\sim 0.4$ （暫定値）^{*1}）。
- ・ 以上のことから、今次地震による大規模被災箇所における堤防被災の主要因は堤体の中（閉封飽和域^{*}）で起こった液状化と推定される。
- ・ 但し、数は少ないものの、被災要因となった液状化が基礎地盤または両方で起こった可能性も否定できない。

液状化の種類	土層構成のイメージ	説明
基礎地盤		<ul style="list-style-type: none"> ・ 治水地形分類図による基礎地盤微地形は旧河道や旧落堀に該当することが多い。 ・ 基礎地盤表層が砂質土等で構成される。
閉封飽和域		<ul style="list-style-type: none"> ・ 治水地形分類図による基礎地盤微地形は氾濫平野に該当することが多い。その他、干拓地、湿地、自然堤防等でも発生する。 ・ 基礎地盤表層が粘性土等の軟弱土層で構成される。

※「閉封飽和域」とは、軟弱粘性土地盤上に砂質系材料を用いて築堤した堤体下部において、圧密沈下により軟弱地盤表層が凹状となり、その上部で堤体に浸透した水が地下水面を有する飽和領域を形成した部分を指す。

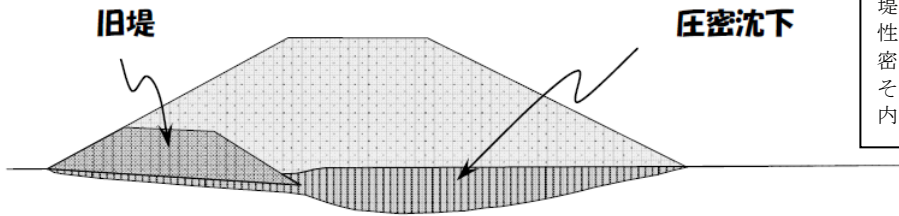
図一 1 3 液状化域の説明模式図

- ・ なお、岡村らの遠心模型実験でも堤体内の飽和領域の厚さの増加と共に地震時安定性が低下すること、また、地盤の圧密沈下による盛土の変形に伴い盛土底部の応力が低減し、液状化しやすくなることが示されている。（山本、岡村：基礎地盤の圧密による盛土の変形が地震時の安定性に及ぼす影響、第 46 回地盤工学研究発表会（発表予定）、地盤工学会、平成 23 年 7 月）

※1 この液状化判定は水平地盤の液状化判定法を準用して得られた結果である。また、粘土地盤の圧密沈下により堤体下部には水平方向に引張り変形が生じ、水平土圧が著しく減少している可能性がある。このような特殊な応力状態の土に対して行った貫入試験結果（N 値）を、液状化判定に用いるに際して水平地盤の N 値と同等に取り扱うことの妥当性も吟味する必要がある。

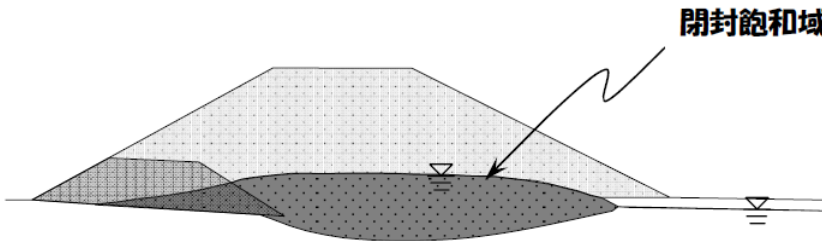
- 堤体内の閉封飽和域が形成される過程、ならびにそこでの土の液状化による堤防の変形過程の説明模式図（仮説）を以下の図-14に示す。

a) 築堤による基礎地盤の圧密



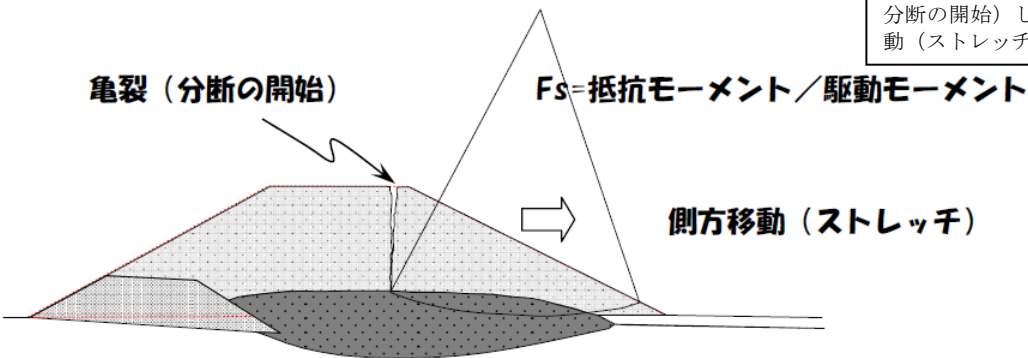
堤体荷重と基礎地盤（粘性土）の圧密特性（層厚と体積圧縮係数 mv ）に応じた「圧密沈下域」の形成。
その結果、アーチアクションにより堤体内の中央・底部の応力は緩和する。

b) 閉封飽和域の形成



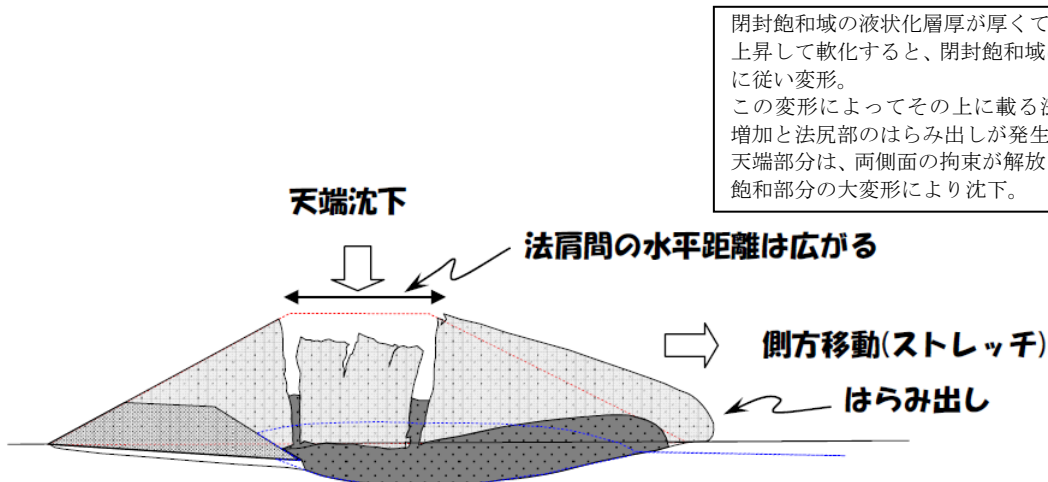
堤体に浸透した雨水は堤体内にたまり、「閉封飽和域」を形成。
注) 左右対称とは限らない。

c) 閉封飽和域での液状化の発生に伴う亀裂の発生



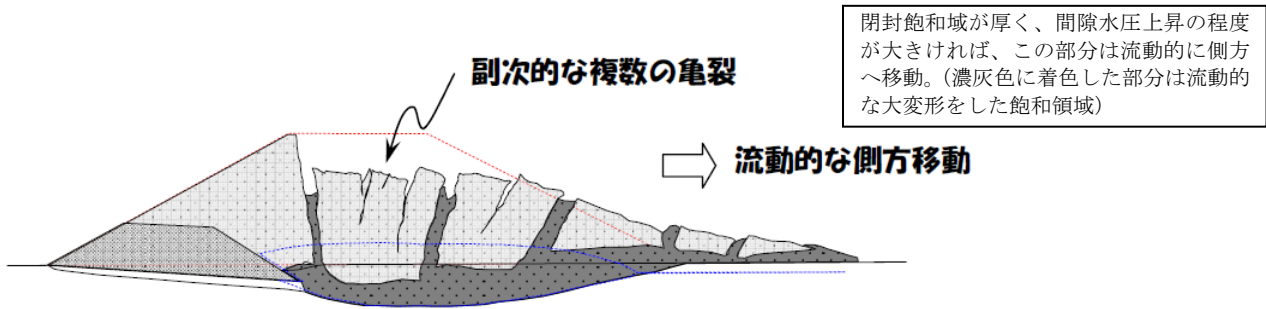
閉封飽和域の土が緩い砂の場合には、地震動により間隙水圧が上昇し、強度低下すれば、 $F_s < 1$ となり、亀裂が発生（堤体分断の開始）し始め、法面部は側方へ移動（ストレッチ）。

d) 閉封飽和域の間隙水圧上昇に伴う変形の拡大



閉封飽和域の液状化層厚が厚くて、さらに間隙水圧が上昇して軟化すると、閉封飽和域は境界応力の大きさに従い変形。
この変形によってその上に載る法面部の側方移動の増加と法尻部のはらみ出しが発生。
天端部分は、両側面の拘束が解放された状態で底部の飽和部分の大変形により沈下。

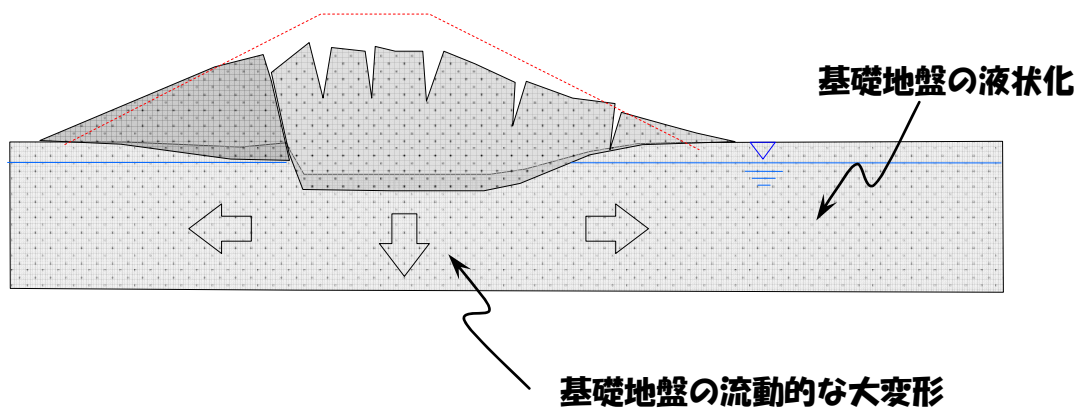
e) 閉封飽和域の間隙水圧上昇に伴う変形のさらなる拡大



図－1 4 (1) 堤体液状化の場合の変形過程の説明模式図

【基礎地盤の液状化による変形過程】

基礎地盤の液状化による堤防変形模式図を下図に示す。基礎地盤の液状化が堤防変形の主要因である箇所として、鳴瀬川 木間塚地区を想定しているが、土質調査中であるため、ここでは既往の堤防被災事例より、一般的な変形状態を示した。



図－1 4 (2) 基礎地盤液状化の場合の変形模式図

【火山灰質土の液状化】

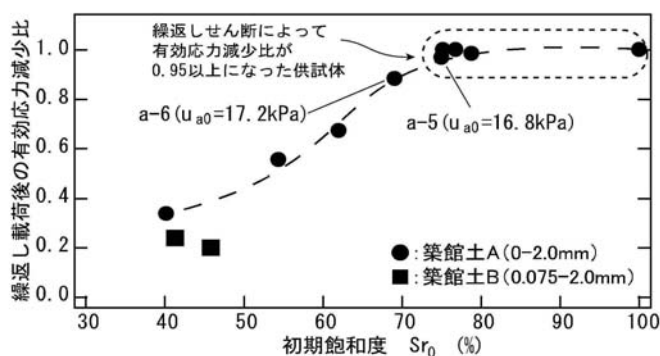
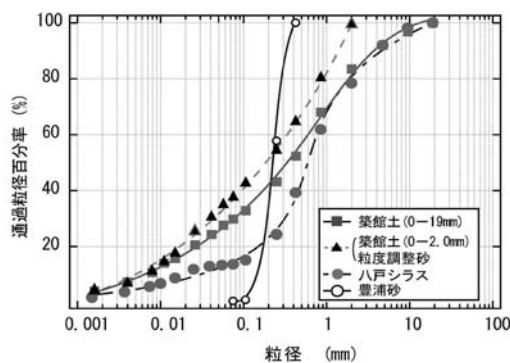
液状化した土層の厚さが特定できていないので、観察された天端沈下量を裏付ける変形計算結果もまだ得られてはいない。しかし、堤体材料に火山灰質の土を用いた箇所では、飽和した部分のみならず不飽和な部分の土も液状化する可能性がある（以下の「参考」参照）ことを考慮することが必要になろう。

(参考)

風間等の研究によれば、不飽和火山灰質土について、初期飽和度が **75%** 程度以上の状態で繰返しせん断された場合には、有効応力減少比が **0.95** 以上となり液状化状態となることが報告がされていることから、閉封飽和域の液状化が考えられる土質については十分な調査を行う必要がある。

試験に用いた試料の物理特性及び粒径粒径加積曲線

試料名	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	粒径範囲 (mm)	細粒分含有率 Fc(%)
築館土 A	2.514	0-2	35.5
築館土 B	2.523	0.075-2	0
粒度調整砂	2.641	0-2	35.2
八戸しらす	2.500	0-2	19.5
豊浦砂	2.643	0.075-0.425	0



繰返し載荷終了時における有効応力減少比とせん断前のサクシヨンの関係

風間基樹、高村浩之、海野寿康、仙頭紀明、渦岡良介：不飽和火山灰質砂質土の液状化機構について、土木学会論文集 C Vol.62 No.2, pp.546 – 562, 2006.6

(2) 本復旧の基本方針

1) 基本方針

【緊急災箇所】

今次の地震による堤防被災の主要因は、「基礎地盤」、「閉封飽和域」のいずれか、または両方で生じた液状化であることから、本復旧にあたっては、以下の事項に留意して再度災害の防止を図る。

① 液状化の発生抑制（被災の主要因の除去）

今回の地震動と同程度のものが作用しても液状化の発生を抑制し、再度災害の防止を図る。

土の液状化は一般に飽和したゆるい砂質土層で生じる。したがって液状化の防止を図る基本は、主要因となった液状化層の地下水位を低下させる、あるいは密度を増加させるか固化することである。今次被災箇所においても、被災箇所の状況に応じていずれかを満足する、または両者を組み合わせる工法を選択する。

② 堤体の切返し・再構築

被災の程度に応じて堤体の一部あるいは全断面の切返し・再構築を行う。切返し・再構築にあたっては、従来の築堤土を用いることが経済的であり、土質特性に応じた施工性を考慮し、必要に応じて石灰添加等による改良を行う。

③ 既往地震の復旧の経験の活用

平成15年の地震で被災し、復旧を行った箇所が今次地震では無被災であった実績も踏まえた工法とする。

④ 将来計画との整合

当該被災箇所を含む区間の改修に関する河川整備計画その他の計画と整合する工法とする。

【一般災箇所】

⑤ 一般災箇所への適用

今回検討以外の一般災箇所においても、上記【緊急災箇所】の考え方を十分踏まえ、被災形態並びに被災の規模（亀裂幅や亀裂深さ等）に応じて適切に工法を選定することが必要である。

なお、緊急災の箇所では数が少なかった基礎地盤の液状化による被災（図-13(2)参照）は、周辺地盤での噴砂の痕跡がその発生を知る重要な手がかりである。周辺地盤での噴砂等から、基礎地盤の液状化が原因である場合には、再度災害防止の観点から基礎地盤の改良が必要である。改良深さはボーリング調査結果によって確定するものとし、その深さに応じた適切な改良工法を選択する。

【今回の地震動と同程度の地震動】

堤防に作用した地震動は、震源からの距離、基礎地盤の土質構成等により異なるが、これを被災箇所毎に精度良く推定するには限界がある。

このため、本復旧にあたって考慮すべき地震動は、図-2(1)、(2)の強震計観測値より下記を参考とする。

北上川、鳴瀬川 : 500gal (古川・石巻の最大加速度から設定)

阿武隈川、名取川 : 400gal (岩沼・角田の最大加速度から設定)

2) 復旧工法

(i) 液状化層の固化、密度増加

① 地盤の固化、密度増加

A. 浅層地盤の固化

大規模被災箇所の大数は堤体内の閉封飽和域の土が液状化したことが原因であり、堤体内に閉封飽和域が形成された理由は基礎地盤の圧密沈下であった。切り返しのため被災した堤防を地盤面まで撤去しても、堤防中央部の凹型に沈下し、地下水面下に没した部分の土を締め固めるのは容易でない。浅いところにあるこの土層の液状化を防止し、その上に再構築する堤体土をしっかりと締め固める際の基礎部分となるこの層を改良する工法としては、浅層地盤を固化改良する工法が適当である。

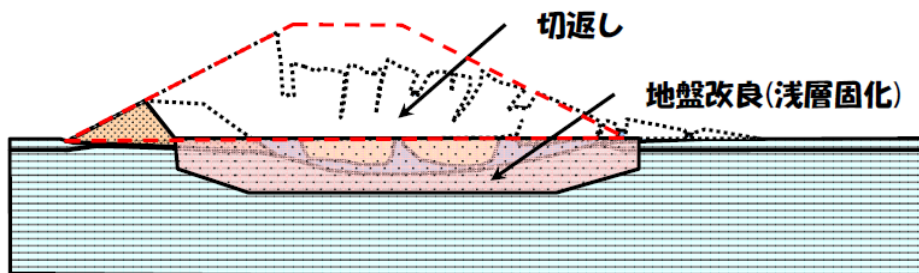


図-15 浅層地盤の固化(浅層改良)

B. やや深い地盤の密度増加

基礎地盤の液状化層が深くまで及ぶ場合には、締め固め等により液状化層の密度を増加させる工法が適当である。なお、施工基盤として敷き砂が必要となる場合には、これを残置すると洪水時の水みちとなる懸念もあることから、ドレーン効果期待できる裏法尻部を除き撤去する。

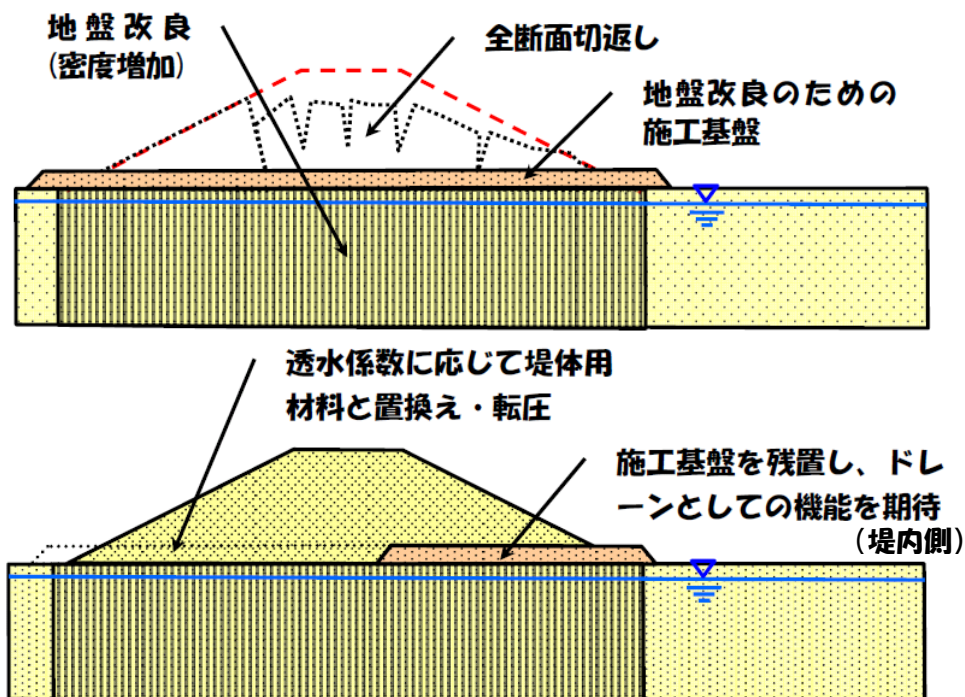


図-16 やや深い地盤の密度増加(深い改良)

② 改良範囲

改良範囲は堤防敷幅の全幅とし、改良深さは周辺地盤の地下水面より下位にあるゆるい飽和砂質土層の底面までとする。

③ 浅層固化の場合の基礎地盤の圧密沈下の進行への配慮

基礎地盤の圧密沈下が収束しておらず、堤体再構築後も圧密沈下が継続すると考えられる場合には、基礎地盤沈下による改良体の破壊が起こらない厚さとなるよう改良深さを深くする。また、圧密沈下が継続するような箇所では、地下水位低下のためドレーン工を併用することが有効である。

④ 緩和区間

堤防縦断方向の堤体基礎地盤の固さが不連続に急変することによる地震時の悪影響を緩和させるため、改良区間と改良しない隣接部との接続部には緩和区間を設ける。

(ii) 地下水位の低下

⑤ ドレーン工

天端や法面から浸透した雨水によって堤体内に形成される閉封飽和域の地下水位を低下させる場合には、裏法尻部にドレーン工を設置することが有効である。ドレーン工は地震時以外にも洪水時の浸潤線の発達を抑制し、浸透に対する安全性向上に寄与する。なお、ドレーン工の底面の深さは、排水の確実性、持続性を考慮し、排水路の流末より低くなることのないようにする。

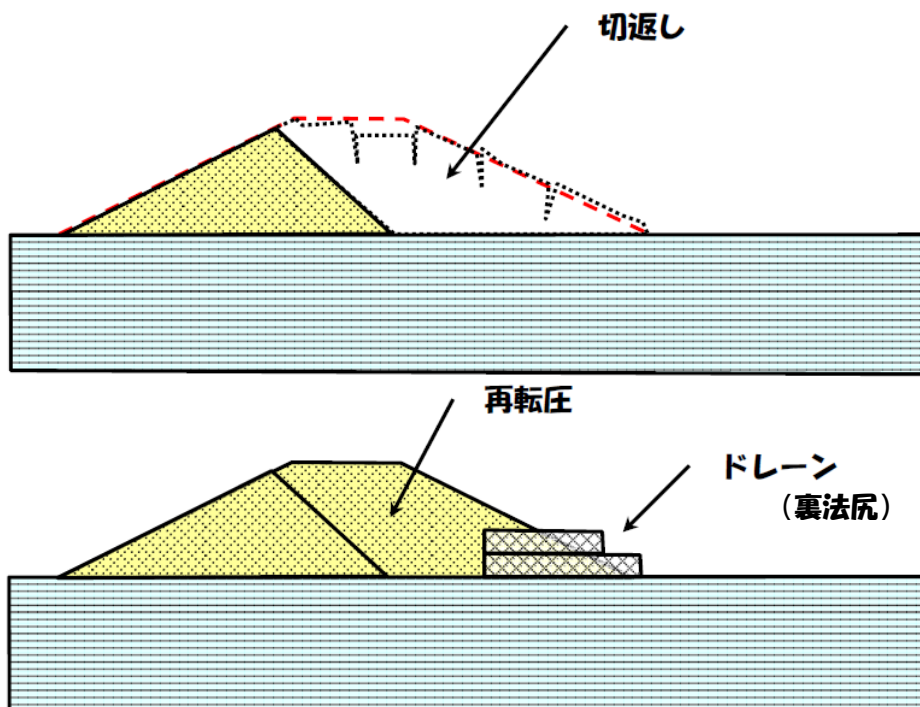


図-17 地下水位の低下 (ドレーン工)

(iii) 堤体土の締固め

⑥ 堤体土の締固め

堤体再構築にあたっては、十分な締固めを行うものとする。締固め度の規定については、河川土工マニュアル（平成 21 年 4 月）によることを基本としつつ、十分な強度が得られるよう締め固める。

⑦ 堤体土の土質改良

被災した箇所 の 堤体材料として火山灰質土が使用されていて、含水比が大きい場合には施工性が極めて悪い（トラフィカビリティーが確保できない、オーバーコンパクションなどの問題）。したがって、このような土を再構築に用いる場合には購入土を用いることとの経済比較を行って添加剤を用いる土質改良を行う。

(iv) その他

⑧ 川表の護岸工

堤防護岸及び高水護岸を設置する場合には、河川水による堤体内浸潤線の発達抑制及び閉封飽和域の抑制の観点から、必要に応じて遮水シート等による河川水の浸透抑制工法を併用する。但し、遮水シートを併用する場合には、堤体内に溜まる水の排水について配慮する。

2. 2 津波被災

(1) 津波による堤防被災の特徴

1) 堤防構造と被災状況

津波により被災した堤防の構造及び被災状況の概要を、河川毎に整理すると以下のとおりである。

記載にあたっては、堤防タイプ及び被災状況からほぼ同様の区間を区分分けして記載している。

[北上川]

- ・北上川において津波が堤防を越水した区間は、津波痕跡調査によると左右岸とも約**11km** までの区間と推定される。越水は、写真及び地域住民の証言（左岸側にある北上中学校から北上川左岸（月浜第一水門）を見る）等から川側からと推定される（河口から北上大橋までの右岸区間を除く）。
- ・左岸は、下流から①特殊堤の流失、②土堤（道路兼用堤防）の堤体の約半分以上の流失、③土堤（道路兼用堤防）の法面の洗掘区間に分割できる。③より上流区間については、越水の痕跡は見られるものの洗掘等の被災は見られない。
- ・右岸は、河口から北上大橋までの区間は浸水等の影響により調査が完了していない。④北上大橋から上流約**1,100m** は堤防（道路兼用堤防）が全断面流失、その上流（道路兼用堤防）は、越水の痕跡は見られるものの、洗掘等の被災は見られない。

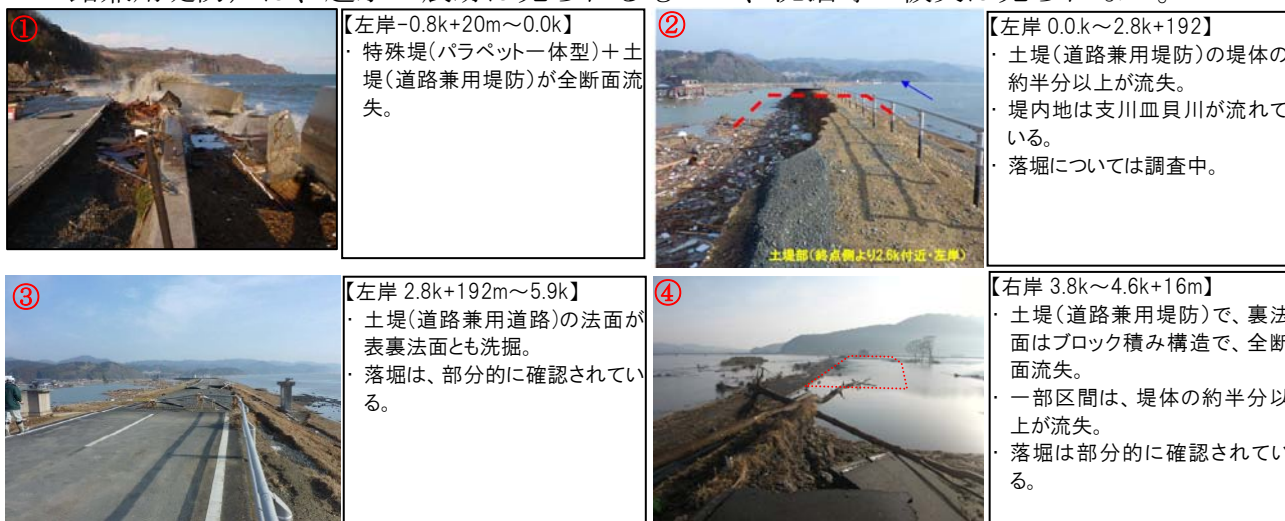


図-18 津波による堤防被災状況（北上川）

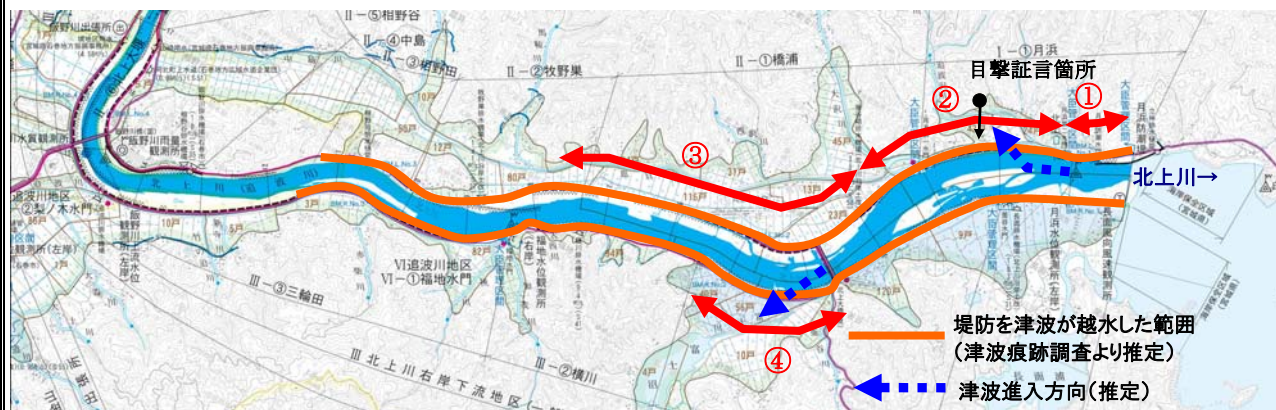


図-19 津波の越水範囲と進入方向（北上川）

[鳴瀬川]

- ・ 鳴瀬川において津波が堤防を越水した区間は、津波痕跡調査によると、左岸が約 1.6km まで、右岸が約 0.8km までの区間と推定される。越水の方法については、地域住民(水閘門操作員)の証言では左岸の河口から 1 km 程度までの区間と右岸区間では堤内側からの越水が、また左岸の約 1km より上流の区間では川側からの越水が卓越したと推定されるが、引き続き調査を行う。
- ・ 左岸は、①土堤(道路兼用堤防)の法面の洗掘が見られる。
- ・ 右岸は、②特殊堤の全断面流失が見られる。その上流(道路兼用堤防)は、越水の痕跡は見られるものの、洗掘等の被災は見られない。



【左岸 0.4k~1.8k】
 ・土堤(道路兼用堤防)の表裏法面で部分的に洗掘あり。



【右岸 0.0km~0.4k+20m】
 ・特殊堤(自立式コンクリート擁壁)の全断面流失。
 ・背面盛土が流失し、特殊堤が倒壊。
 ・落堀は部分的に確認されている。



—— 堤防を津波が越水した範囲 (津波痕跡調査より推定)
 ←--- 津波進入方向(推定)

図一 20 津波による堤防被災状況(鳴瀬川)

図一 21 津波の堤防越水範囲と進入方向(鳴瀬川)

[名取川]

- ・ 名取川において津波が堤防を越水した区間は、津波痕跡調査によると、左右岸とも約1.0km までの区間と推定される。越水の方角については、地域住民(水閘門操作員)の証言では左岸は堤内側から、右岸は川側からの越水と推定されるが、引き続き調査が必要である。藤塚地区は、海から遡上した津波が直接、越水したものと推測される。
- ・ 左岸は、①土堤の表裏法面の洗掘が見られる。②藤塚地区は主に土堤の裏法面の洗掘が見られる。
- ・ 右岸は、河口から閑上水門までの区間は、③土堤の法面の洗掘が見られる。④閑上水門から上流の特殊堤(自立式擁壁タイプ)区間は、背面の土堤部分が流失している。重力式擁壁部は、パラペット部の継ぎ目にズレはあるが、傾斜等の損壊は無い。
- ・ 被災状況は、写真及びコメントのとおりである。

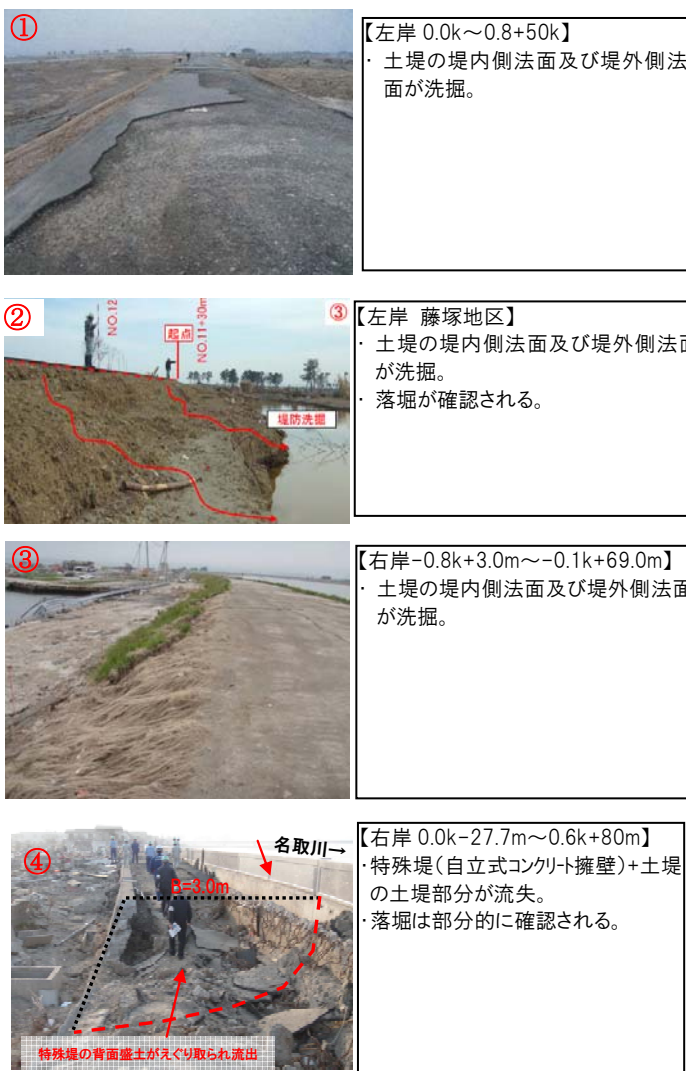


図-2-2 津波による堤防被災状況(名取川)

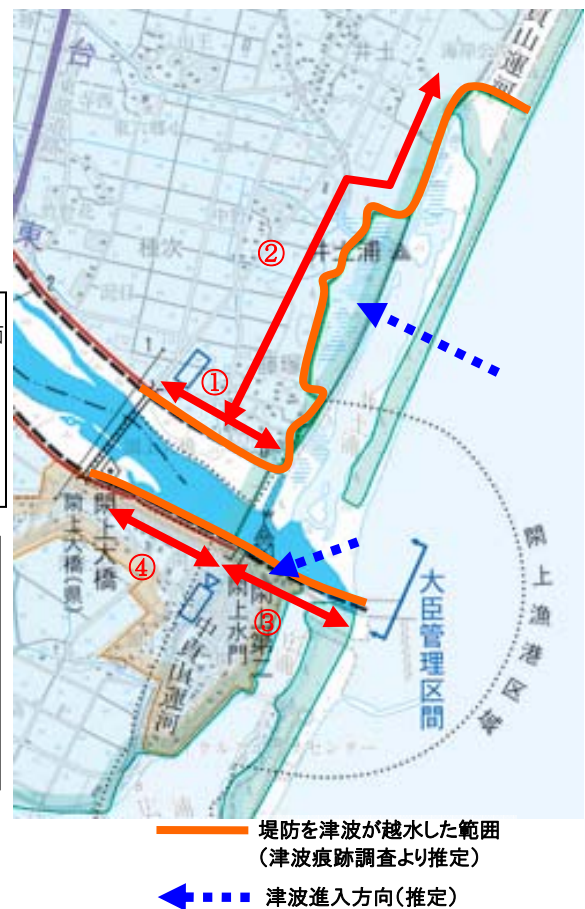


図-2-3 津波の堤防越水範囲と進入方向(名取川)

[阿武隈川]

- ・ 阿武隈川において津波が堤防を越水した区間は、津波痕跡調査によると、左岸が約 **0.8km** まで、右岸が約 **1.8km** までの区間と推定される。越水の方法については、右岸側はパラペットの飛散状況から川側からと推定されるが、左岸は引き続き調査が必要である。
- ・ 左岸は、①土堤の法面の洗掘が見られる。
- ・ 右岸は、②河口から約 **270m** の区間が特殊堤の土堤部流失及びパラペットが流失、その上流区間については、裏法面の洗掘及びパラペットの流失が見られる。



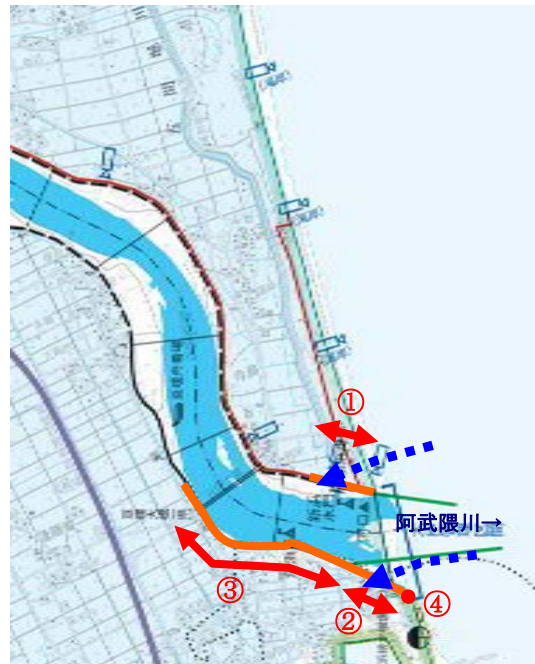
① 【左岸 0.0km~0.0k+100m】
 ・ 土堤の堤内側法面、堤外側法面及び天端部が洗掘。



② 【右岸 0.0k-170m~0.0k+100m】
 ・ 特殊堤(コンクリート護岸+パラペット+土堤)の土堤部及びパラペットが流失。
 ・ 表法面の護岸は残っている。
 ・ 落堀は部分的に確認されている。



③ 【右岸 0.0k+100m~1.6k】
 ・ 特殊堤(コンクリート護岸+パラペット+土堤)のパラペットが流失。
 ・ 表法面の護岸は残っている。
 ・ 裏法面は洗掘されている。
 ・ 落堀は部分的に確認されている。



— 堤防を津波が越水した範囲 (津波痕跡調査より推定)
 ← 津波進入方向 (推定)



河川堤防と海岸堤防の接合部分が津波によって決壊

【右岸河川堤防に隣接する海岸堤防】
 ・ 河川堤防に隣接している海岸堤防は一部流出している。
 ・ 落堀が確認されている。

図-24 津波による堤防被災状況 (阿武隈川)

2) 堤防被災の形態

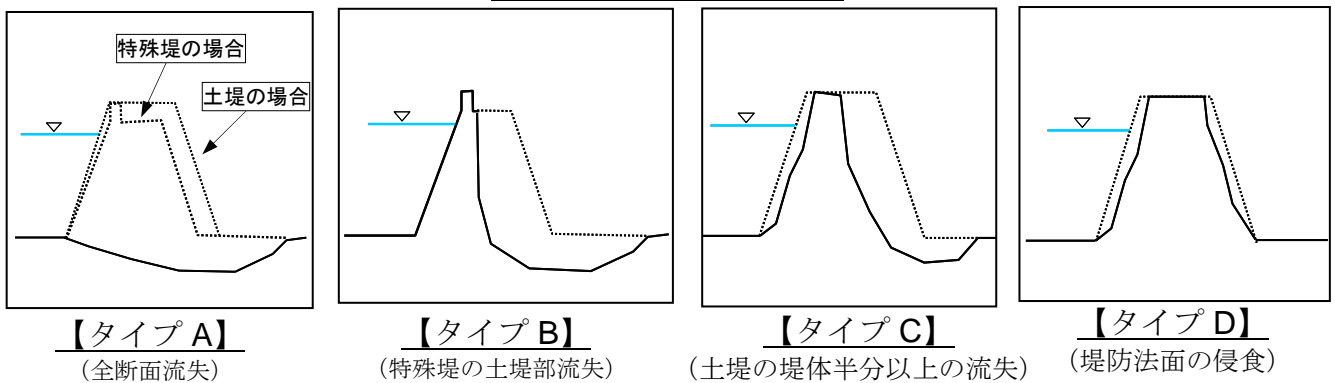
- ・前項の被災状況から、堤防タイプ及び被災形態を分類整理した。
- ・被災形態の分類は現時点の情報から整理したものであり、今後の調査、検討により変更がある。

表-2 被災状況把握一覧

		北上川				鳴瀬川		名取川				阿武隈川			
		左岸		右岸		左岸	右岸	左岸		右岸		左岸		右岸	
		①	②	③	④	①	②	①	②	③	④	①	②	③	④
堤防タイプ	土堤		○	○	○	○		○	○	○		○			
	特殊堤 (パラペット)												○	○	
	特殊堤 (自立式擁壁)	○					○				○				(○)
被災形態	堤体全断面の流失				○		○								(○)
	特殊堤の土堤部流失	○					○				○		○		
	土堤の堤体半分以上の流失		○												
	堤体法面部の洗掘			○		○		○	○	○		○		○	
	パラペットの流失													○	
被災タイプ		B	C	D	A	D	A	D	D	D	B	D	B	D	(A)

※阿武隈川右岸(④)は海岸堤防部の流出状況

図-25 被災タイプ図

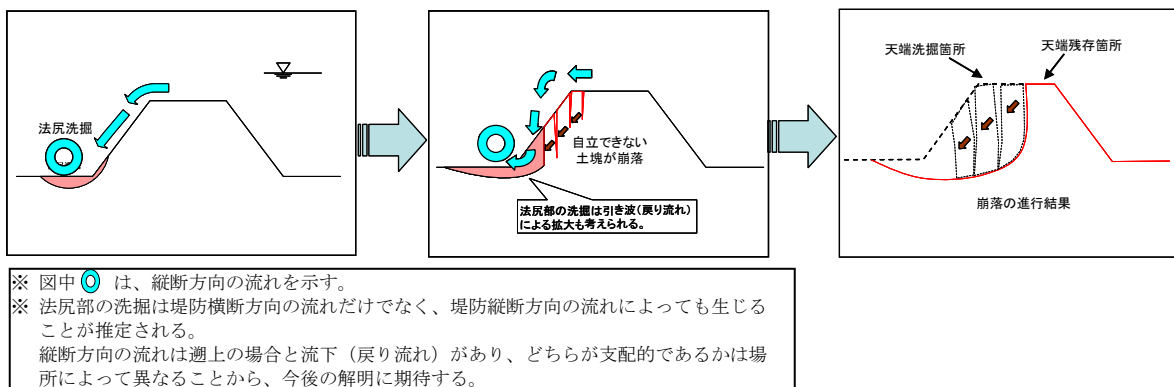


※タイプC及びタイプDは、表法のみ、裏法のみ、または両方のケースがある。

3) 被災過程の推定

前項までの被災状況や被災形態の特徴の考察から考えられることを整理すると以下のとおりである。

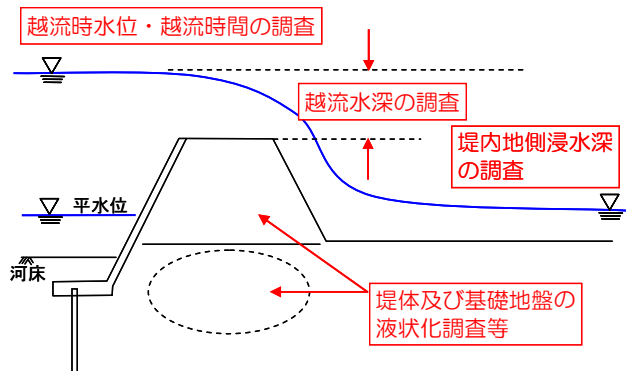
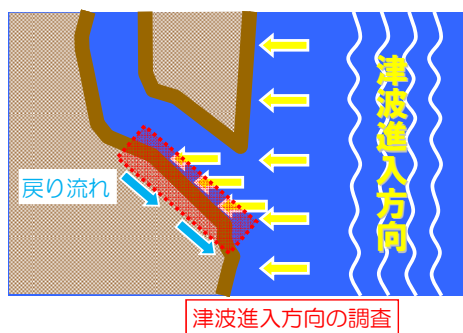
- ① 土堤部の断面が大きく減じた区間（堤体断面の半分程度以上の減少区間）は、川表側から川裏に向かって津波が越流した区間、または堤体側法尻に沿った戻り流れがあった可能性の高い区間に多い。
- ② 海岸堤防を越えて堤内地に浸水した水が堤内地から川表側に向かって越流したと考えられる区間でも土堤部の断面が大きく減じた区間があった。
- ③ 越水の生じなかった津波遡上区間では、のり面の侵食などの損傷が生じた区間は少なかった。
- ④ 堤防タイプ「土堤」あるいは堤防タイプ「特殊堤」の川裏側に盛土した部分の被災過程は、越流した津波の流れ（堤防横断方向）または堤防法尻に沿った縦断方向の流れによってのり面およびのり尻近傍（法尻に近いのり面やのり尻に接する基礎地盤表面）が洗掘され、法面部分の土が自立できなくなって局所崩壊が起こり、さらに洗掘され崩壊が進行する進行性の崩壊を起こし、最終的に土を用いた部分が流失するに至ったと推定される。



図－26 越流による堤体の洗掘・崩壊過程模式図

- ⑤ この結果、堤体全断面が流失する決壊や特殊堤のコンクリート構造だけが残った区間が生じたと推定される。
- ⑥ なお、本震直後の津波襲来直前に撮られた名取川右岸の写真から堤防周辺で地盤液状化が生じたと認められる区間が存在していることから、堤防被災の全てが津波の影響だけによるものではなく、区間によっては地盤液状化の影響の可能性を否定できない。

以上の見解は、現時点までに得られた知見に基づくもので、被災機構のさらに合理的な解明のためには次図（図－27）に例示するように、今回の被災にまつわる事象を継続して調査することが必要である。



図－２７ 津波被災の主要因を推定するための調査・検討

今回の津波による河口部近傍の堤防被災に関する因子には次のものが考えられる。

誘因

- ・ 地震動による地盤や堤体の液状化
- ・ 津波の越流
- ・ 河川遡上時の河道に沿った流れ
- ・ 堤内地から河道への流れ
- ・ 堤内地から海岸に向かう戻り流れ（堤内側の法尻に沿った流れ）

素因

- ・ 堤防構造（天端舗装、法面被覆工、根固め工を含む）
- ・ 堤防直下の基礎地盤条件
- ・ 堤内の標高などの地形条件、建物などを含む地被状況
- ・ その他、地殻変動による沈降

(2) 本復旧の基本方針

【本復旧に当たり考慮すべき事項】

- ・ 津波対策について、二段階の津波レベルに分けて検討する提言がなされようとしている（土木学会東日本大震災特別委員会 津波特定テーマ委員会 第1回報告会資料）。
- ・ 河口部における河川堤防は、海岸堤防との整合性を有する必要があるが、現時点では確定していない。
- ・ 津波による堤防の被災区間の多くは、地域の交通体系にとって欠かせない道路との兼用工作物になっている。
- ・ 河口部以外の堤防と共通の特性ではあるが、段階的に強化を重ねてきた堤防の堤体材料やその締め固め状況、ならびに地盤特性などのデータは少ない。
- ・ 一部区間では浸水している地域での施工となることや、河川水に接した区域での施工となる区間が存在している。

【河口部堤防の本復旧の基本方針】

前項までの記述と上記事項に基づき、今次被災の本復旧の基本方針を以下の通りとする。

- ① 洪水及び高潮に対する対策として、堤防形状を復旧し、洗掘に対する強化を行うことを基本とする。
- ② 復旧する堤防高は、地殻変動による地盤沈降分を考慮した高さとする（地盤沈降による必要な高さについては、測量結果から決定する）。
- ③ 復旧する堤防形状は、下記のタイプを基本とする。
 - A. 堤防全体が流失した箇所（鳴瀬川右岸野蒜地区及び北上川右岸釜谷地区）については、全断面を土堤により復旧する。
 - B. 特殊堤の土堤部が流失している箇所（阿武隈川右岸荒浜地区及び名取川右岸閑上地区）については、土堤により復旧する。なお、パラペットが流出している範囲は、パラペット分の高さも土堤により復旧する。
 - C. 土堤で法面が洗掘されている箇所（北上川左岸月浜地区や鳴瀬川左岸、名取川左岸、阿武隈川左岸）については、洗掘箇所を盛土で復旧する。
- ④ 復旧にあたっては、必要な土質調査を実施するとともに、適切な工法を選択する。
- ⑤ 洪水及び高潮による洗掘に対する強化対策として、被災状況に応じて護岸を設置する。
- ⑥ 必要に応じて液状化対策等を行う。
- ⑦ 接続する海岸堤防の復旧計画が示された場合には、整合を図る。
- ⑧ 隣接するまちづくり等の計画が明らかとなった場合には、整合を図る。

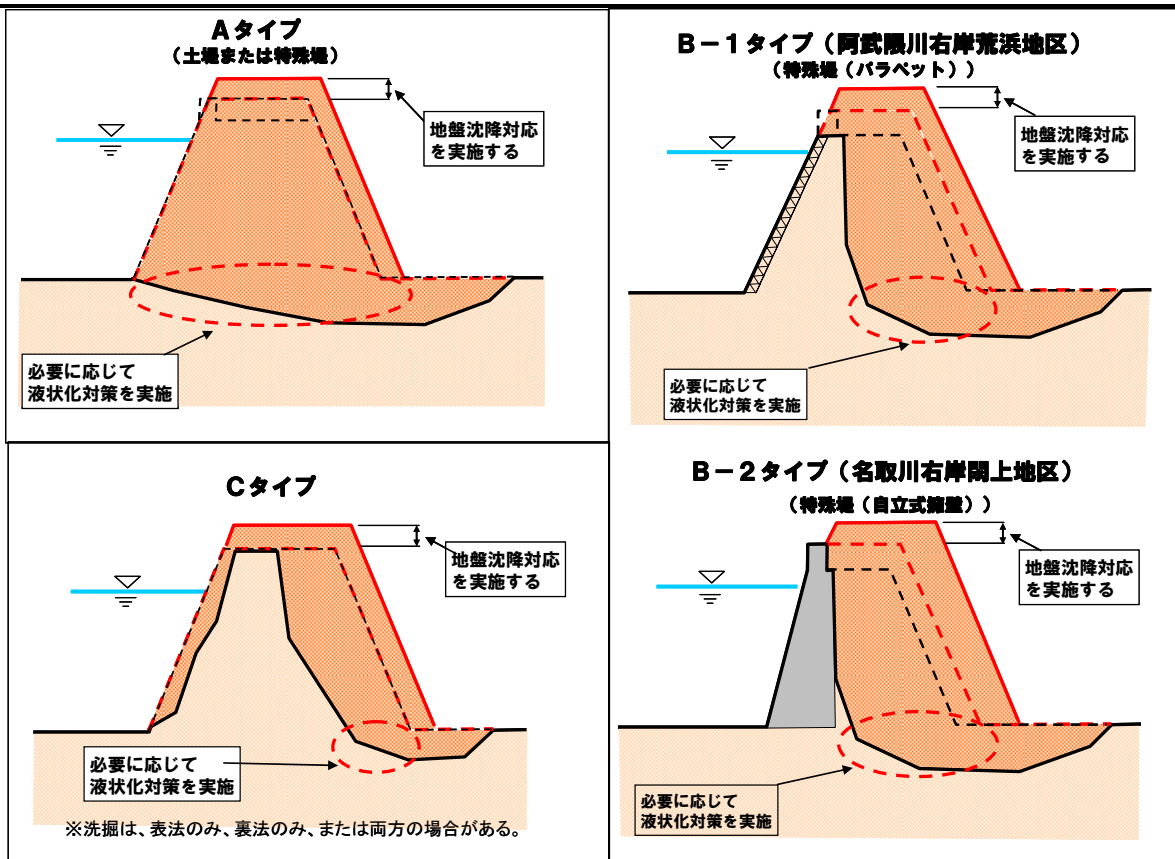


図-28 タイプ別基本形状

3. 堤防等被災後の河川管理方針

堤防被災後においては、従前にも増して河川管理の強化が必要であり、施設管理と危機管理体制の構築、実践が極めて重要である。
このため、以下の事項について、実施していくことが重要である。

1) 被災した堤防等の施設管理

【被災実態を踏まえた堤防等の管理】

- ・ 被害が全川に及んでおり、かつ規模も大きいため本復旧に時間を要する。このため、今出水期は仮復旧の状態での洪水を迎えることになる。
- ・ 被災実態は、津波被災区間と地震被災区間で異なり、仮復旧の状態もまた異なる。
- ・ それぞれの区間で堤防がどのような状態にあるか（仮復旧の状態が維持できているか、新たな被害箇所が無いかなど）を適切に施設管理に反映させる必要がある。
- ・ このため、巡視・点検に際しては被災状況と仮復旧の状況を記した図面・写真等を携行することが必要である。

【河川管理施設（堤防・樋門樋管等）や許可工作物の重点監視】

- ・ 堤防の亀裂、陥没、法崩れ、ならびに樋門樋管、許可工作物などの被災が明らかでない箇所以外についても余震の影響等により新たな被災（増破を含む）の可能性がある。
- ・ 従来の巡視・点検に加え、重要区間を定めるとともに、津波被災区間・地震被災区間のそれぞれの被災形態と仮復旧の状況に応じた点検項目を定め、継続的な重点監視を実施する。
- ・ 異常箇所等の早期発見や重点監視の充実を図るため、防災エキスパート等の活用により実施する。

【P】<河川巡視計画の見直し>

※今後1年間は堤防等河川管理施設・許可工作物を重点的に巡視・点検

- 特定巡視を通じ重点的な点検項目や重要区間を設定
 - ・点検項目：堤防、樋門樋管等を重点的に点検
津波被災区間・地震被災区間のそれぞれの被災形態と仮復旧の状況に応じた点検項目
(法面の変形・陥没、湿潤、湧水、植生、噴砂跡等)
 - ・頻度：毎月1回、出水後、その他必要に応じ実施
 - ・方法：原則徒歩による

【D】<体制確立と点検の実施>

- 体制確立：防災エキスパートの積極活用等
- 点検のポイント
 - ・堤防周辺も重視：堤内地も含め隆起や噴砂等の状況把握
 - ・出水期前の再点検：新たな被災箇所、増破の有無を確認
 - ・仮復旧箇所点検：仮復旧後の変状等の早期発見、堤体水位（浸潤線）の測定
 - ・構造物と周辺点検：異常箇所の早期発見



【A】<点検結果の活用>

- 点検により把握した課題の解決
- 点検結果の評価に基づく洪水予報等基準水位の見直し
- 水防活動上の注意箇所の選定と周知
- 必要に応じ点検項目や重点区間の再設定

【C】<記録と点検結果の評価>

- 継続的な記録 → 健全度評価
- 課題の抽出・整理 → 監視項目の整理
- 対応方針の検討 → 対策の有無、モニタリング計画
- 委員会等を活用した評価

2) 危機管理

【水防資機材の確保】

- ・ 出水等に備え、大型土のう等の水防資機材を備蓄。

【河川堤防の復旧状況に応じた、洪水予報、水防警報の見直し】

- ・ 復旧状況に応じた堤防高の評価。
- ・ 予報・警報の基準となる危険水位や水防団出動水位等の見直し。
- ・ 気象台、県と協議し関係機関に周知。→市町村の避難勧告等の判断基準に資する。

【基準水位の見直しの考え方】

○第一段階（被災後～仮復旧完了；概ね出水期前）

- ・ 被災要因（堤防及び基盤等）が把握できておらず、仮復旧も完了していないため出水に対して無防備な状態。
- ・ 出水が生じた場合は早めの警戒・早めの避難が最優先（基準水位をワンランクダウン）。

○第二段階（仮復旧完了～本復旧完了；概ね次年3月末）

- ・ 被災要因が概ね把握でき、仮復旧も実施された状態。
- ・ ただし、本復旧が完了していないため、復旧状況に応じた対応が必要。

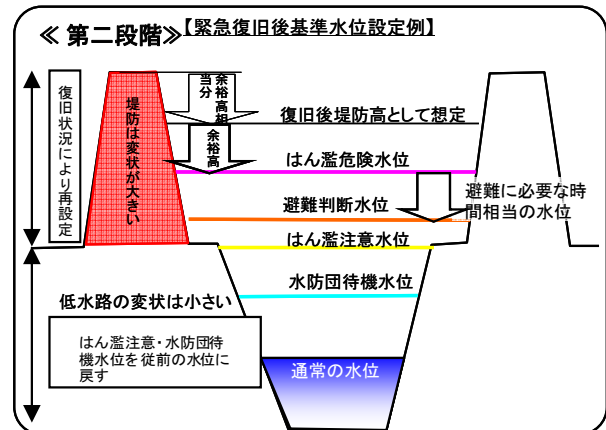
※復旧状況：仮復旧が完了した状態（堤防の形を確保するが、質については不十分（締固め度の管理は行われていない、残存堤防の緩み））。

※対応方針：低水路満杯相当までは安全に流下可能として基準水位を元に戻す。
堤防部分については復旧の状況により再設定（下図参照）。

○第三段階（本復旧完了～） → 現行基準により再設定

【第二段階の考え方】

復旧状況や地殻変動による地盤沈降を踏まえ、堤体部と基盤となる高水敷（または堤内地盤）以下を区分する。また、河口部については地盤沈降に加え潮位の状況を考慮し、仮復旧状況での河道流下能力を確認する。



あとがき

「東日本大震災」をもたらした「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」は、わが国の直轄河川の堤防に被害をもたらした地震としては新潟地震以降 15 回目の被害地震であった。この地震では、広域にわたる強い地震動、長い継続時間におよぶ揺れ、津波の堤防越流、地殻変動による地盤沈降など、誰も経験したことのない事象が生じた。

この中間報告に記載された技術検討会としての見解はあくまでも暫定的な見解である。今後も継続される地盤調査、開削調査、津波の痕跡調査、津波被災区間での被災実態の調査によって新たに明らかになる事項によって暫定的な見解は深まり、あるいは異なる見解へと変わる可能性を持っている。新たな見解が出された場合には、復旧の実施設計や詳細設計に迅速に反映されることを期待している。

今回の堤防被災には土の液状化、津波の越流、地盤沈降が深く関わっているが、被災機構の解明には欠かせない幾つかの事象についてさらなる調査と議論が必要である。

「土の液状化」がもたらしたこの地域の堤防被災には粘性土地盤の圧密、堤体内に滞留した水、堤体材料土の挙動がからんでおり、被災後の堤体の分断挙動とともに、傾斜した地盤、法面を有する盛土の下の地盤の液状化や、液状化することによる盛土の中の応力変化などに関する議論が必要とされる

地殻変動による地盤沈降や津波がもたらした被災の機構解明に関しては、現在でもまだ議論の出発点となる被災実態の調査結果は十分ではないし、越流した津波の流れ、戻り流れの実態についても明らかになっていない。堤防構造とこれらの流れの相互作用の結果としての被災の機構解明に役立つよう、できるだけ緻密・詳細な記録がまずは蓄積されねばならない。効率的に調査を進めるための調査手法や着目点についての助言も必要と考えられる。

最後に、身辺に少なからぬ懸念を抱えつつ被害調査・復旧業務・震後の河川管理に従事する河川管理者の方々、ならびに協力企業を始めとするさまざまな組織、立場の方々に敬意を表しておきたい。これらの方々による調査の成果と協力なくしては、技術検討会の審議は成立しない。技術検討会として深甚なる敬意を表する次第である。