

**東日本大震災を踏まえた
今後の河川堤防の耐震対策の進め方について
報告書（案）**

**平成 23 年 9 月
河川堤防耐震対策緊急検討委員会**

はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、東北地方から関東地方の広範囲にわたって河川堤防が被災し、被災箇所は 2,000 箇所を超えた。このなかには、堤防機能を失するような大規模な被災も含まれている。この地震による河川堤防の被災は、過去の地震による堤防の被災と比較して、範囲も規模も甚大であり、河川堤防の耐震性確保の必要性やそのあり方を見直す重要な機会と考えられる。

我が国は氾濫原における人口や資産の集積が著しく、堤防はこれらを洪水、高潮等から防御する重要な構造物である。河口部等の低平地では、平常時の河川水位が地盤高より相対的に高いところも多く、また、大規模地震の発生後には津波の河川遡上も同時に発生することが考えられる。そのため、地震によって堤防が被災した場合、平常時の潮位や地震に伴う津波、堤防の復旧までの間に生じる洪水、高潮による水位上昇に伴い、甚大な浸水被害が発生する懸念がある。

また、我が国は地震国であり、東海地震、東南海・南海地震をはじめとして、いつどこで大規模な地震が発生してもおかしくない状況にあり、これらの地震を対象とする地震対策は急務となっている。

以上のことから、東日本大震災で得られた河川堤防の被災に関する知見を整理し、今後の耐震対策手法の改善等に反映させるべく、河川堤防耐震対策緊急検討委員会が設置された。

本検討委員会は、半年という限られた時間の中で緊急的に検討を進めたものであり、今後さらに検討を深めるべき課題も多くあるものの、河川堤防の耐震対策として取り組むべき事項を具体的にとりまとめることができたと考えている。この報告を踏まえ、関係者の努力により河川堤防の地震に対する安全性の確保が着実に進められることを期待する。

平成 23 年 9 月 日

河川堤防耐震対策緊急検討委員会

目 次

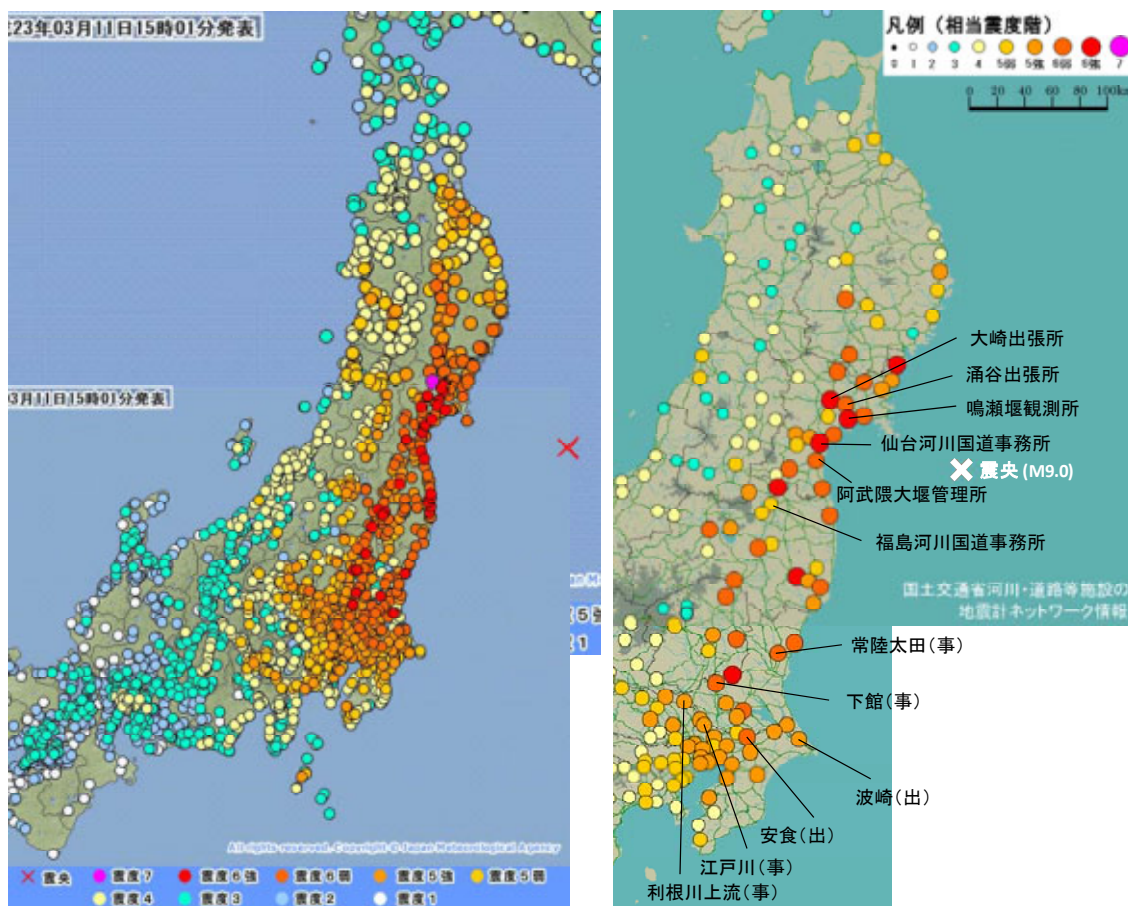
1. 東日本大震災における地震動と堤防被災の特徴.....	1
(1) 地震の概要	1
(2) 地震動の特性	2
(3) 堤防被災の特徴.....	6
 2. 被災プロセスの分析.....	10
(1) 基礎地盤の液状化	10
(2) 堤体の液状化	11
 3. 耐震性能照査手法の検討.....	15
(1) 基本的考え方	15
(2) 基礎地盤の液状化に対する照査.....	17
(3) 堤体の液状化に対する照査.....	20
 4. 耐震対策工の検討.....	24
(1) 基礎地盤の液状化に対する対策.....	24
(2) 堤体の液状化に対する対策.....	27
(3) 留意事項.....	30
 5. 今後の耐震対策の推進について.....	32
(1) 照査の推進	32
(2) 優先度を考慮した対策の推進	33
(3) 危機管理対応	35
 6. 今後の技術研究の方向性.....	37
(1) 照査に関する課題	37
(2) 対策に関する課題	38
(3) 危機管理対応に関する課題.....	39

1. 東日本大震災における地震動と堤防被災の特徴

(1) 地震の概要

- 平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県で震度 6 強など、東北地方から関東地方の太平洋側を中心に広範囲で非常に規模の大きい揺れを観測した（図-1）。

- ・発生日時：平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃
- ・マグニチュード：9.0（暫定）
- ・震央：三陸沖（牡鹿半島の東南東、約 130km 付近）（暫定）
- ・震源深さ：約 24km（暫定）
- ・最大震度：7（宮城県栗原市築館）



気象庁※1)

国総研地震計ネットワーク※2)

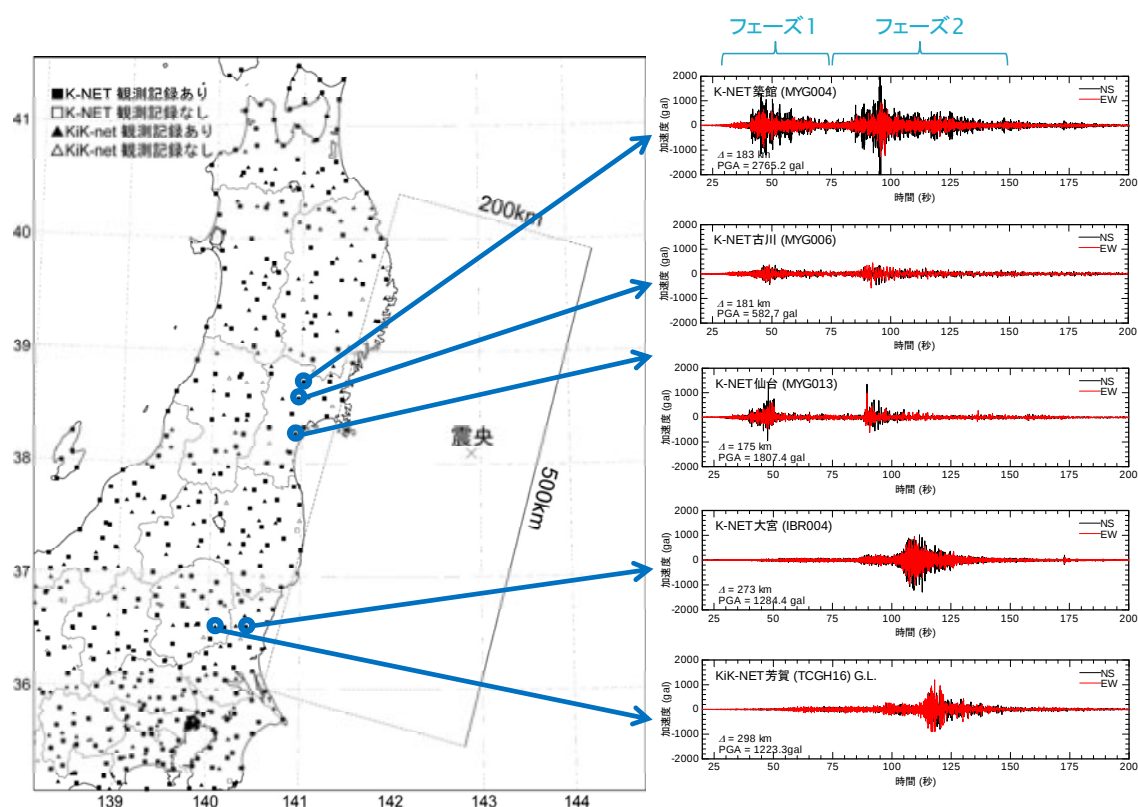
※1) 気象庁：地震情報より引用，<http://www.jma.go.jp/jp/quake/>

※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をもとに作成，
<http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/>

図-1 震度分布

(2) 地震動の特性

- この地震では、東北地方及び関東地方において、2 分を越える継続時間（「50gal 以上の地震動が続いた時間」と定義）の地震動を観測した。これは、近年の被害を生じた地震の地震動と比較して、長い継続時間であった（図-2、図-3）。



防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-NET)のデータをもとに作成,
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/> kyoshin

図-2 地震動の加速度波形

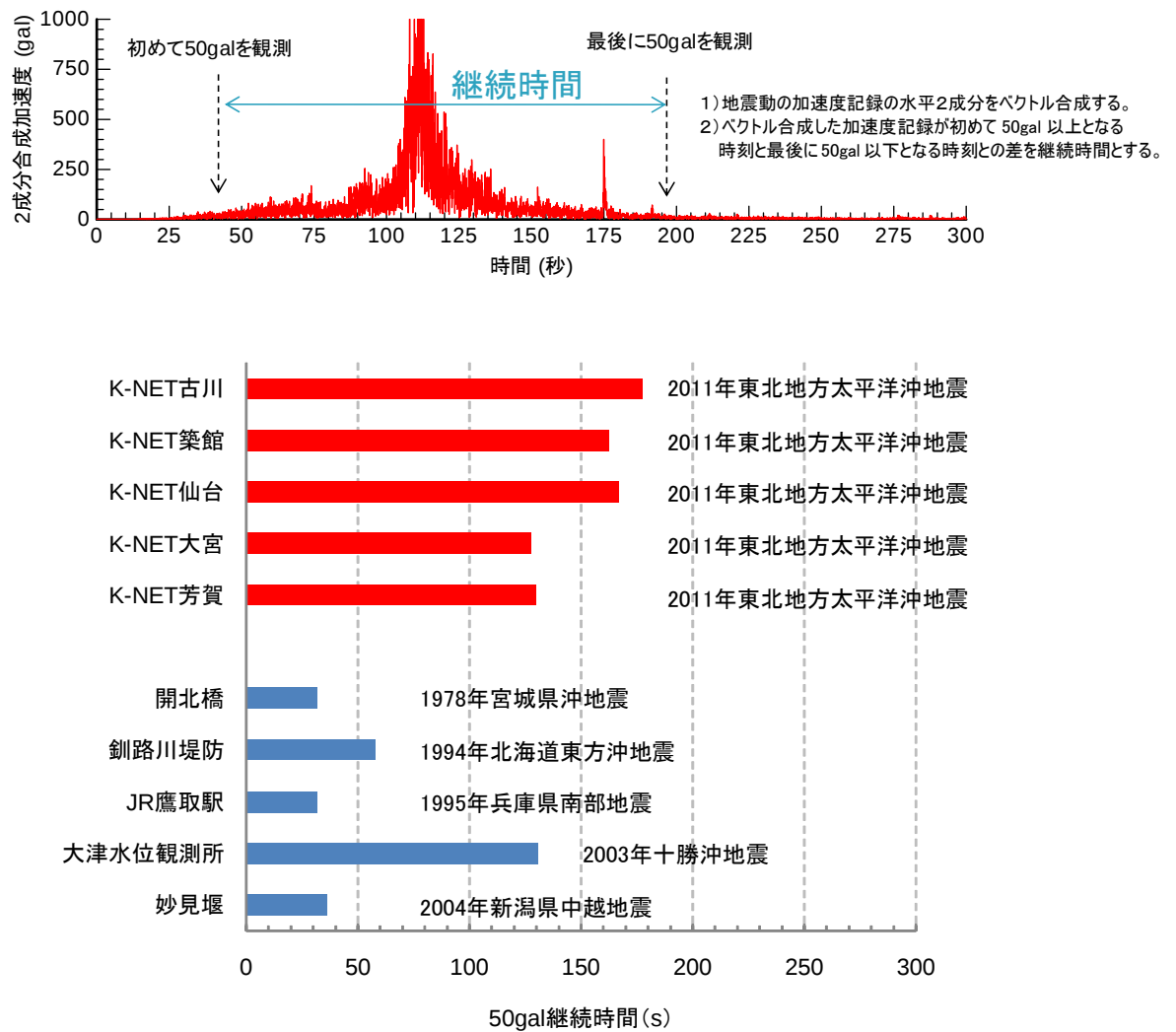
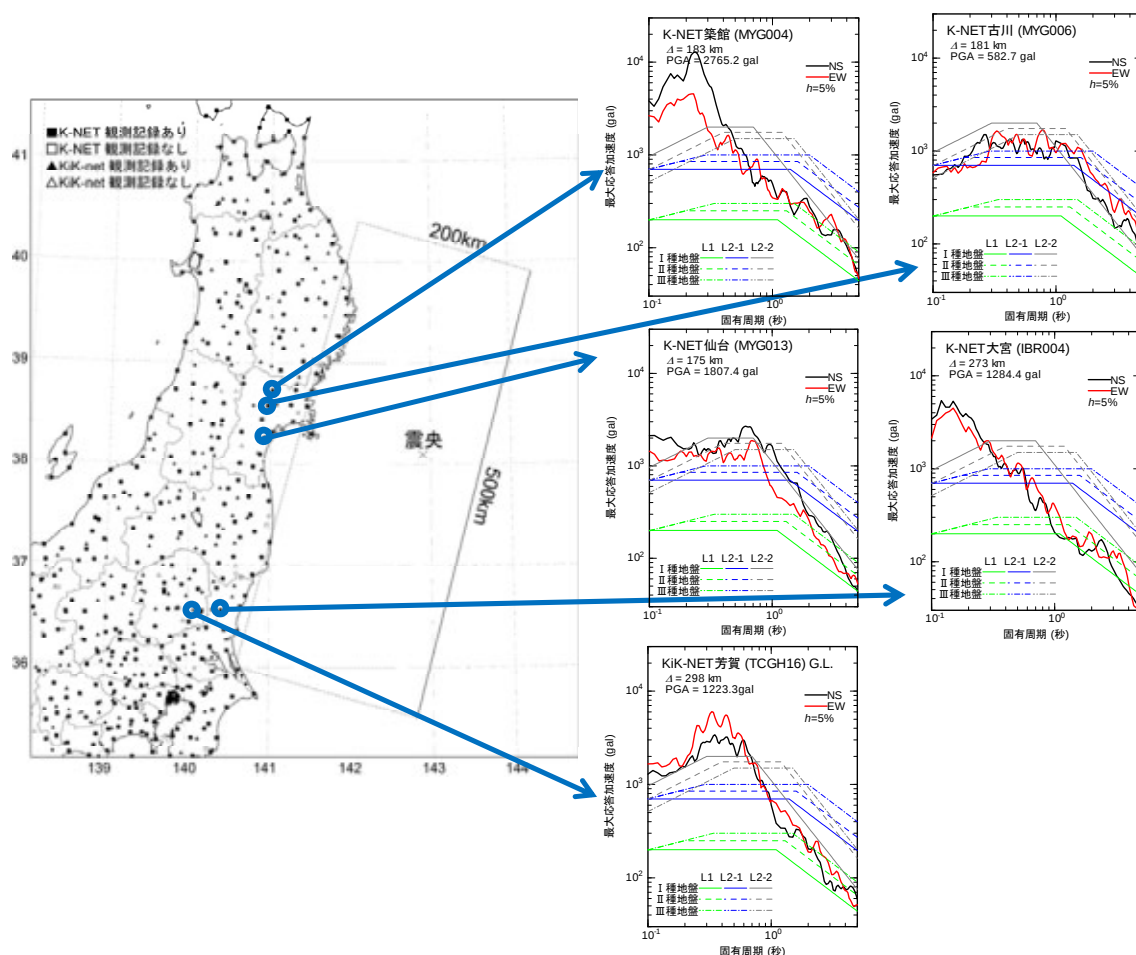


図-3 地震動の継続時間（既往地震との比較）

- この地震の加速度応答スペクトルは、近年の被害を生じた地震と比較して、短周期領域では上回る観測点もあり、中間周期領域から長周期領域では同程度またはそれ以下であった（図-4、図-5）。



防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-NET)のデータをもとに作成、
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/> kyoshin

※図中の折線は、河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説に示されている加速度応答スペクトル（河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説の加速度応答スペクトルは、道路橋示方書・同解説の加速度応答スペクトルと同等）

L1：構造物の供用期間中に発生する確率が高い地震動

L2：対象地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動
 （L2-1：プレート境界型、L2-2：内陸直下型）

I 種地盤：良好な洪積地盤及び岩盤

II 種地盤：I 種地盤及びIII 種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤

III 種地盤：沖積地盤のうち軟弱地盤

図-4 地震動の加速度応答スペクトル

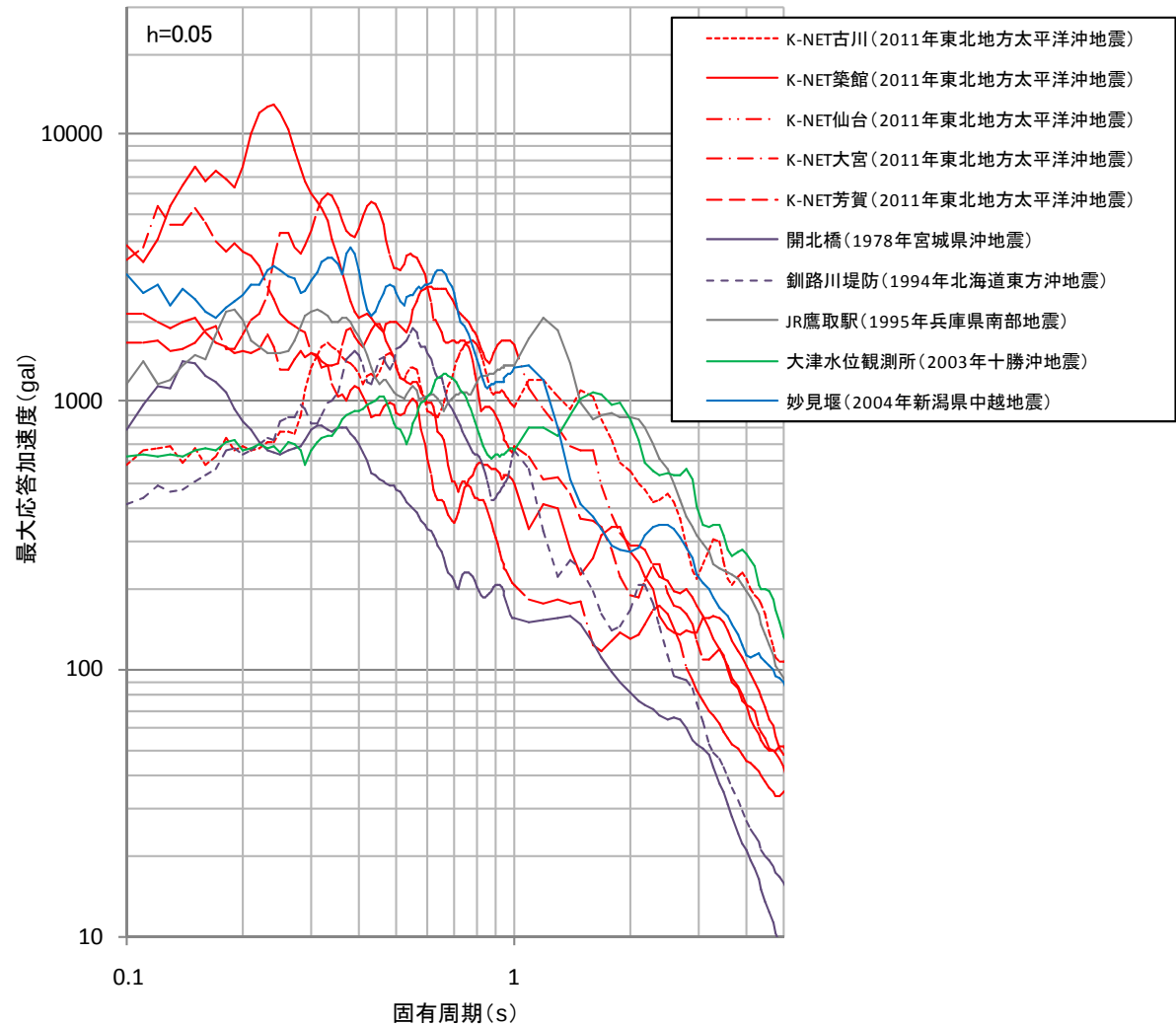


図-5 地震動の加速度応答スペクトル (既往地震との比較)

(3) 堤防被災の特徴

- 今次の地震では、東北地方、関東地方にわたる広範囲で堤防の被災が多数発生した。土構造物である堤防の被災は液状化の影響を大きく受け、液状化の発生や程度には地震動の強度、継続時間の長さや繰り返し回数の多さが影響したと考えられる（図-6）。



図-6 東日本大震災における堤防の被災区域、被災箇所数

- 地震時の河川水位は平水位程度であり、地震前1ヶ月の累加雨量は、利根川水系で約150mm程度、那珂川水系、久慈川水系で80mm程度、東北地方の各水系で40～50mm程度であり、過去5年の同時期の降雨量と同程度であった(図-7)。

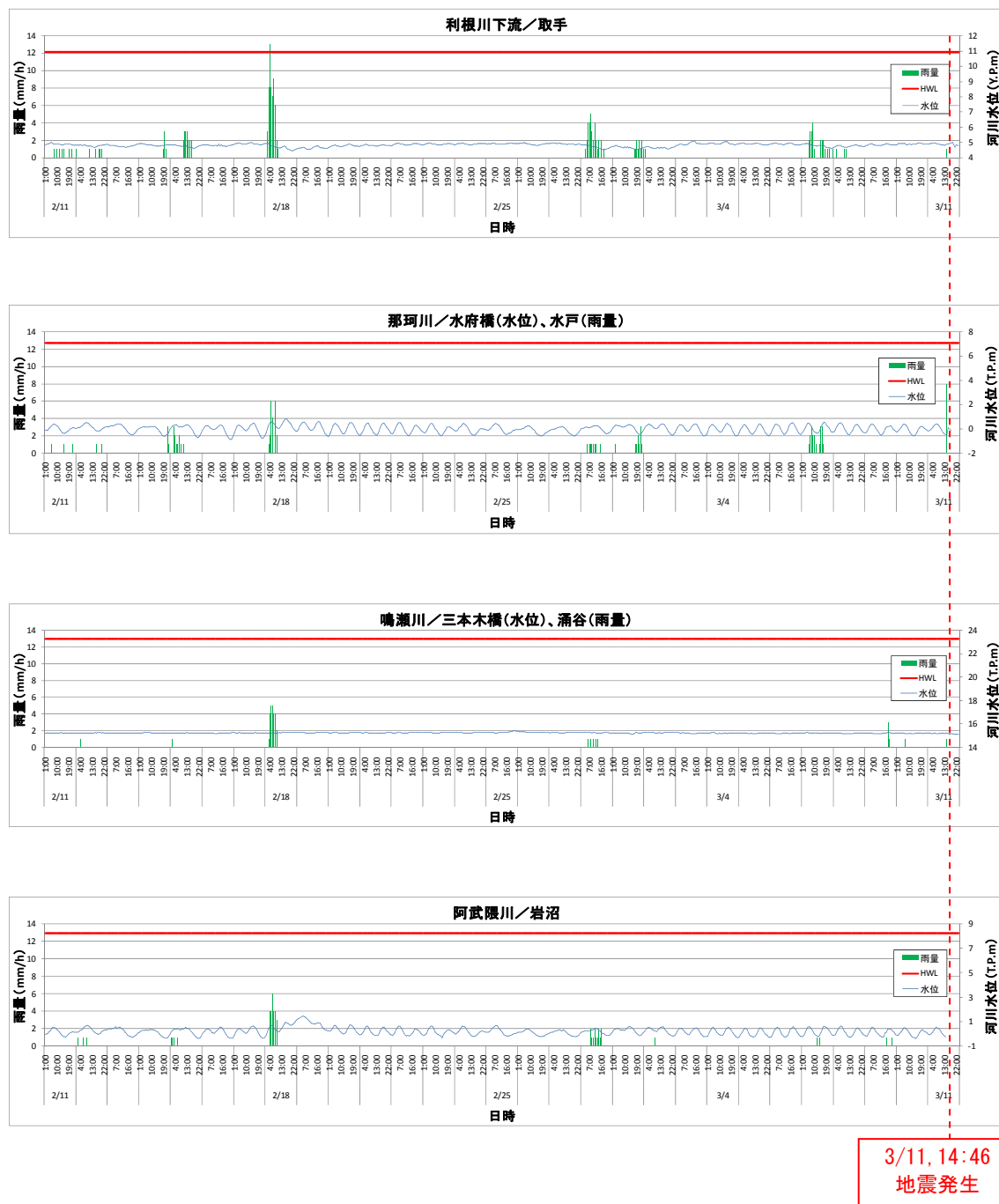
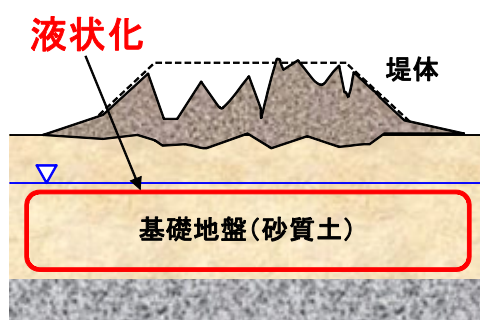


図-7 震災前1ヶ月間の主要被災河川における河川水位、雨量

- 被災した堤防（土堤）の沈下量が 3m を超える箇所もあり、このような大規模な変形（沈下、のり崩れ、亀裂等）の原因は液状化であった。従来から被害の形態として想定されていた基礎地盤の液状化を原因とするものが多数発生した他、これまで地震による堤防の被災として主眼が置かれていなかった堤体の液状化による被災が多数発生した（図-8、図-9）。

基礎地盤の液状化



利根川下流（右）71k 付近
（千葉県印旛郡栄町）
※堤体も液状化している可能性



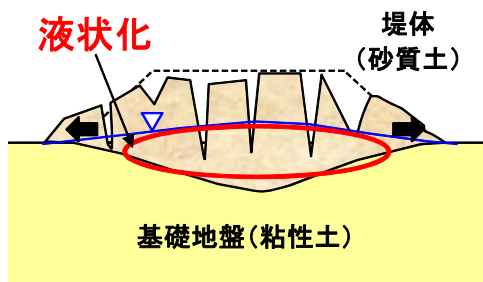
鳴瀬川（左）20k 付近
（宮城県遠田郡美里町和多田沼）



小貝川（右）32k 付近
（茨城県常総市上蛇地先）

図-8 基礎地盤の液状化と推定される堤防の主な被災

堤体の液状化



阿武隈川下流（右）31k 付近
（宮城県角田市）



江合川（右）27k 付近
（宮城県大崎市）



潤沼川（左）7.5k 付近
（茨城県東茨城郡下石崎地先）

図-9 堤体の液状化と推定される堤防の主な被災

2. 被災プロセスの分析

(1) 基礎地盤の液状化

- 基礎地盤の液状化による堤防の被災が発生するプロセスは、基礎地盤の緩い飽和砂質土層が地震動により液状化し、その剛性・強度が低下することで、堤防の自重により水平方向の伸張を伴って鉛直方向に圧縮し、堤体のすべりや天端の亀裂・陥没等の変状が生じるものと考えられる（図-10）。

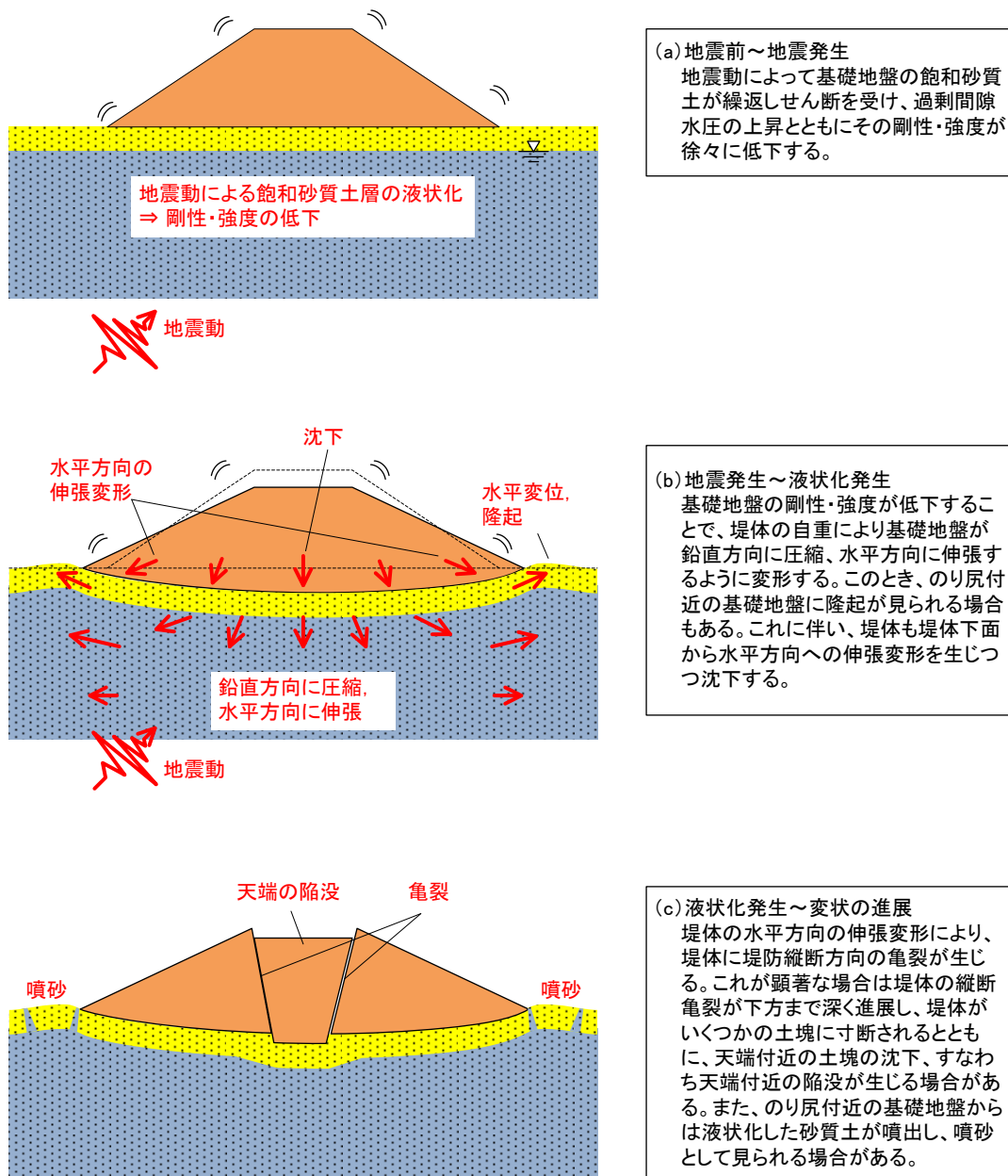
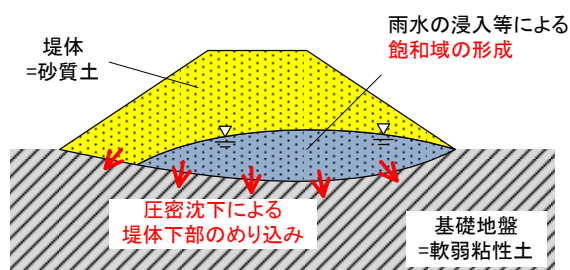


図-10 基礎地盤の液状化による被災メカニズム

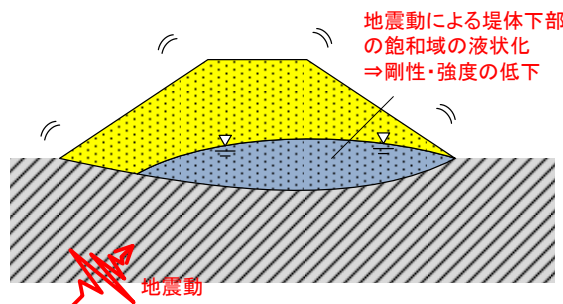
(2) 堤体の液状化

- 堤体の液状化による堤防の被災が発生するプロセスは、次のように推定される。軟弱粘性土層上に築堤した場合、堤体下部の軟弱地盤層の上面が圧密沈下により凹状となる。凹状となる築堤後の圧密沈下の過程で、堤体の側方伸張変形により、堤体の密度の低下や拘束力の低下（ゆるみ）が生じていると考えられる。その凹部の堤体材料が砂質土の場合には降雨等の浸透水が滞留し、堤体内に飽和した堤体領域が形成される。この領域が地震動によって液状化することにより、剛性・強度が低下し、堤体のすべりや天端の亀裂・陥没等の変状が生じるものである（図-11～図-14）。



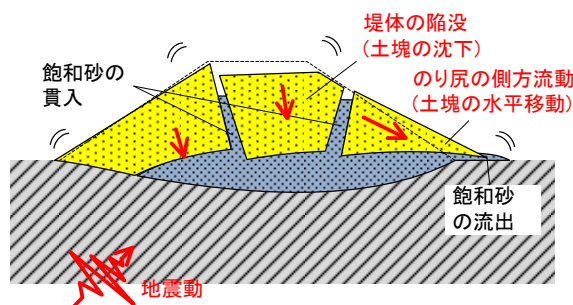
(a) 地震前

基礎地盤が軟弱粘土の場合、地震前より、圧密沈下によって堤体が基礎地盤にめり込むように沈下する。沈下した部分は、築堤後の圧密沈下の過程で、堤体の側方伸張変形により、堤体の密度の低下や拘束力の低下（ゆるみ）が生じていると考えられる。また、堤体材料が砂質土の場合、基礎地盤の透水性が低い一方で堤体の透水性が高いため、堤体内に浸透した雨水等が堤体下部に滞留し、常時飽和状態となりやすい。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することもある。



(b) 地震発生～液状化発生

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) 液状化発生～変状の進展

堤体下部の飽和域の液状化により、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。

「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 北上川等堤防復旧技術検討会

図-14(1) 堤体液状化の場合の変形過程の説明模式図

をもとに作成

図-11 堤体の液状化による被災メカニズム



写真① 表のり面は幾重にも縦断亀裂が発生するとともにはらみ出しが見られる



写真② 亀裂内は水がたまり、高含水の砂質土が充填されている



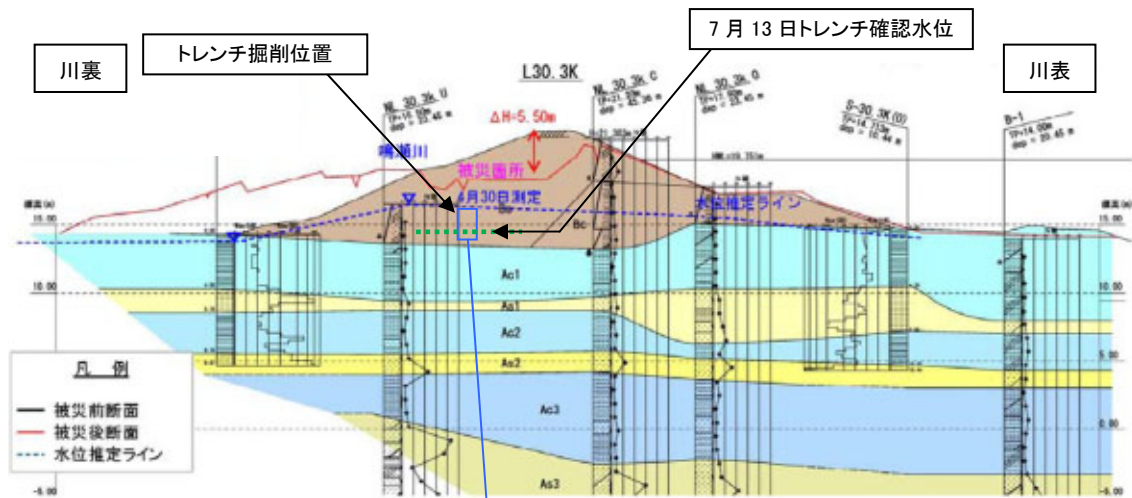
写真③ 裏のり面のはらみ出しが見られる



写真④ 裏のり尻のはらみ出し状況
末端部ではらみ出しが見られる

東北地方太平洋沿岸地震：堤防・護岸・氾濫状況踏査報告（その2）
国土技術政策総合研究所，H23.3.14 より引用

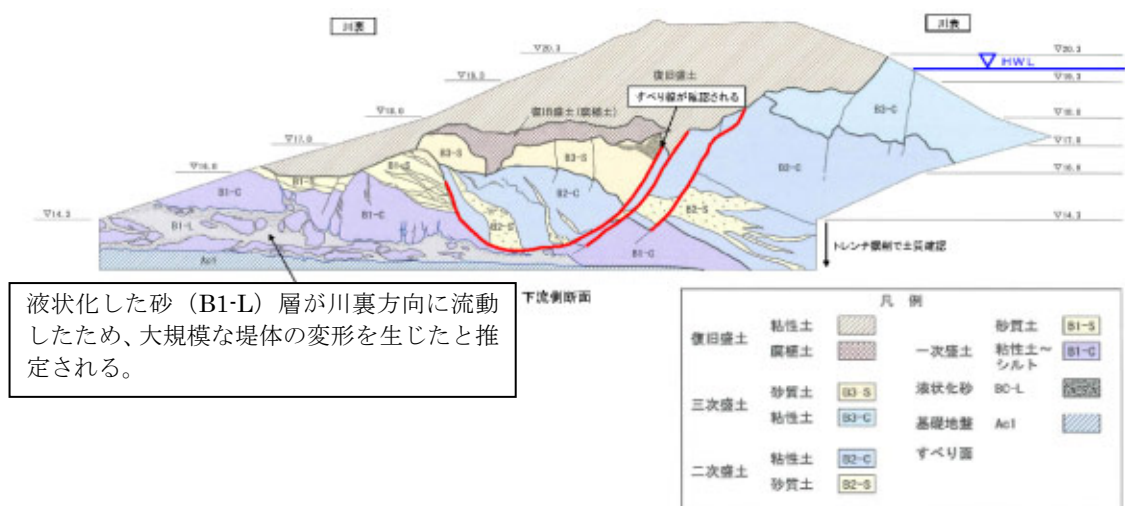
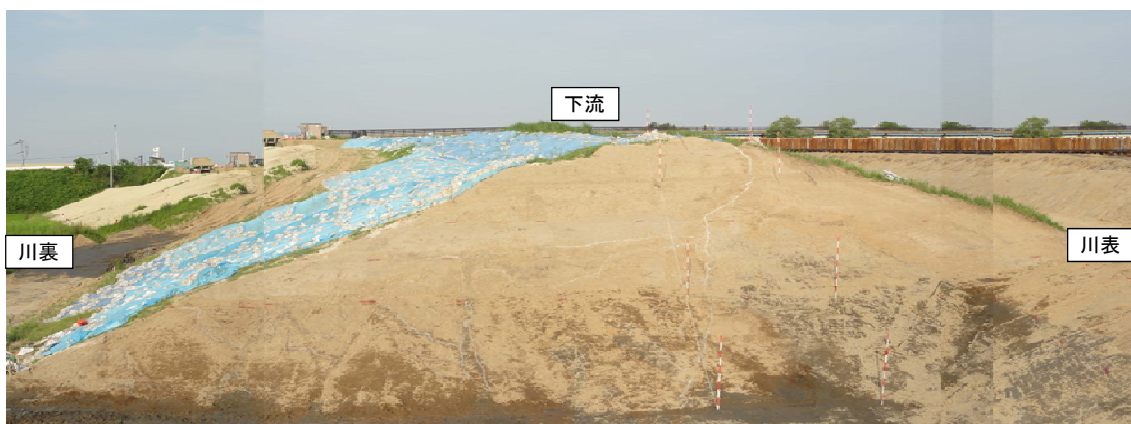
図-12 堤体の液状化と推定される堤防の被災状況
(鳴瀬川 左岸 30.0k~30.5k+37m (下中ノ目上流地区))



平成 23 年 7 月 13 日撮影

※図中の青破線は被災後(4/30)のボーリング坑内水位より推定した堤体内水位、緑破線は被災後(7/13)にトレンチ掘削を行って確認した堤体内水位であり、4/30 以前 1 ヶ月間の累加雨量は 76mm、7/13 以前 1 ヶ月間の累加雨量は 131mm である。
 ※圧密沈下によって基礎地盤にめり込むように沈下した堤体下部に水位が確認できる。

図-13 堤体の液状化による被災と推定される堤防の堤体内水位
 (鳴瀬川 左岸 30.0k~30.5k+37m (下中ノ目上流地区))



※ボーリング坑内水位や、トレンチ掘削により確認された堤体内水位より下に位置していた堤体下部の砂層（B1-L）が液状化して裏のり尻付近まで流出しており、また、その上方の堤体土がいくつかの土塊に寸断されている様子が確認できる。

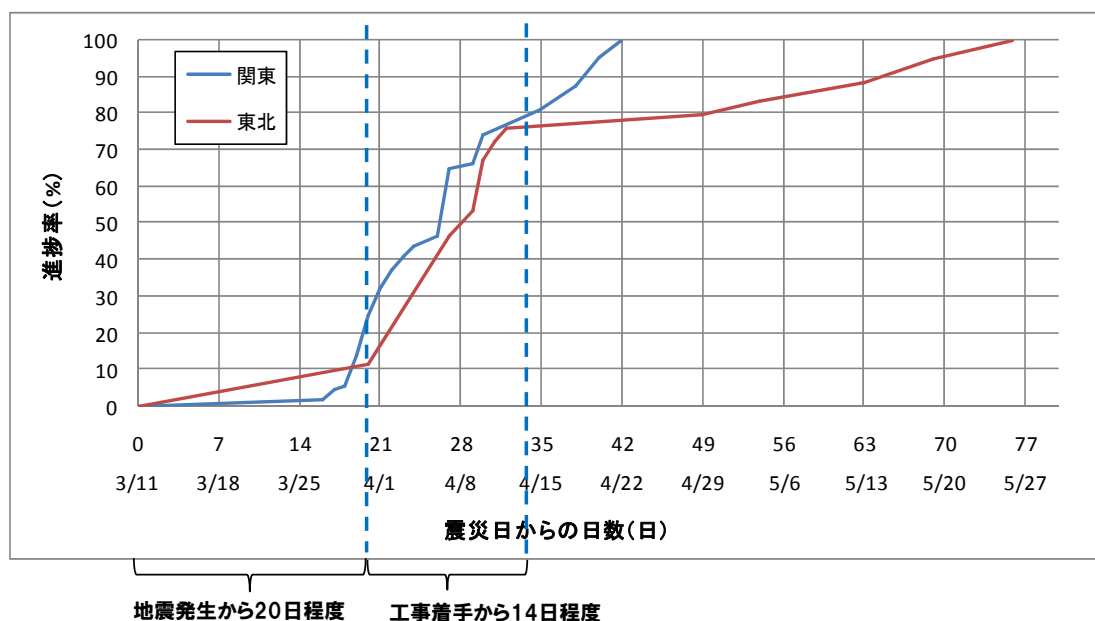
図-14 堤体の液状化による被災と推定される堤防の開削調査状況
（鳴瀬川 左岸 30.0k～30.5k+37m（下中ノ目上流地区））

3. 耐震性能照査手法の検討

(1) 基本的考え方

- 平成 19 年 3 月に「河川構造物の耐震性能照査指針（案）」（国土交通省河川局治水課）（以下、「指針（案）」）が通知され、いわゆるレベル 2 地震動を対象とした堤防の耐震性能照査が開始された。
- 指針（案）では、盛土による堤防（土堤）は、その構造上、地震に対して損傷をまったく許容しないことは不合理であること、一般に、地震による損傷を受けても短期間で修復可能であることから、地震によって堤防に損傷を生じても、「照査外水位」に対して越流を生じない機能を保持することを、堤防の耐震性能としており、堤内地盤高が「照査外水位」よりも低い区間を照査対象区間としている。なお、「照査外水位」は、平常時の最高水位（原則として 14 日間に発生する確率が 1/10 の水位※）であるが、地震の発生に伴う津波高については考慮することとされている。
- この耐震性能照査の基本的考え方は、これまでと同様とし、堤内地盤高が照査外水位よりも低い区間を照査対象区間とする。
- 今次の被災においては、大規模な津波災害等の影響が広範囲に及んだことで、道路被害や津波被害箇所の復旧、行方不明者の捜索等を優先した対応がとられたため、堤防については、従来想定してきた「被災後から概ね 14 日間」での緊急復旧ができなかったが、緊急復旧工事着手後は、14 日間でほぼ緊急復旧を完了している。このため、標準的には 14 日で緊急復旧が可能であると考え、当面、照査外水位について、現行の「14 日間に発生する確率が 1/10 の水位」とする考え方は変更する必要はないと考えられる。ただし、今次の被災のように地震による被災の影響が広範囲に及んだ場合や、地震と洪水が同時に生起するような場合等を想定して、別途、危機管理対応の検討が必要である（図-15）。

※「14 日間に発生する確率が 1/10 の水位」とは、10 年間で 1 度発生する水位という意味ではなく、「14 日間に 10%の確率で発生する水位」を示す。



※大規模に被災した堤防のうち、鋼矢板二重締め切り施工箇所、津波による被災箇所、水門等構造物被災箇所を除いた、緊急復旧工事を対象とした。
 ※地震発生後概ね 20 日間は緊急復旧の進捗率が低い、工事着手後は 14 日間で概ね緊急復旧工事が完了した。

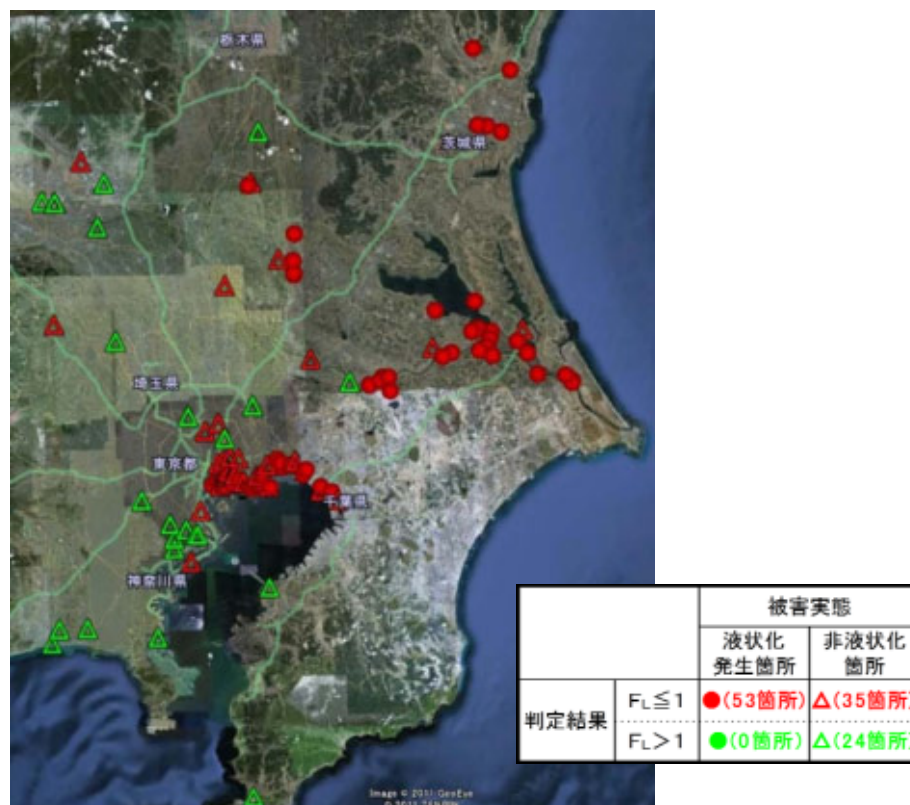
(6/12 18:00 現在 治水課調べ)

図-15 大規模に被災した堤防の緊急復旧工事の進捗状況

- 平成 19 年度以降、指針（案）に基づいて、照査対象区間約 1,570km の 5 割強、約 830km の照査が実施されてきたが、これは堤防の基礎地盤の液状化による沈下、変形を照査対象事象としたものであり、堤体の液状化を考慮した耐震性能照査はほとんど実施されてこなかった。今後は、基礎地盤の液状化による沈下、変形に加え、堤体の液状化による沈下、変形も照査の対象事象に含める必要がある。

（２）基礎地盤の液状化に対する照査

- 基礎地盤の液状化による沈下、変形は、これまでも照査の対象としてきた事象である。液状化の発生や程度には地震動の強度、長い継続時間や繰り返し回数の多さが影響していると考えられ、そのため、今次の地震では多くの地点で堤防の被災が発生したと考えられる。
- 現行の液状化判定法（FL 法）は今次の地震についても液状化発生を概ね整合して判定できる（見逃さない）結果が得られた。非液状化箇所の判定結果を踏まえてさらなる研究が必要であるが、現行の液状化判定法（FL 法）をただちに見直す必要は低いことが確認されている（図-16）。



「液状化対策技術検討会議」検討成果 平成23年8月31日

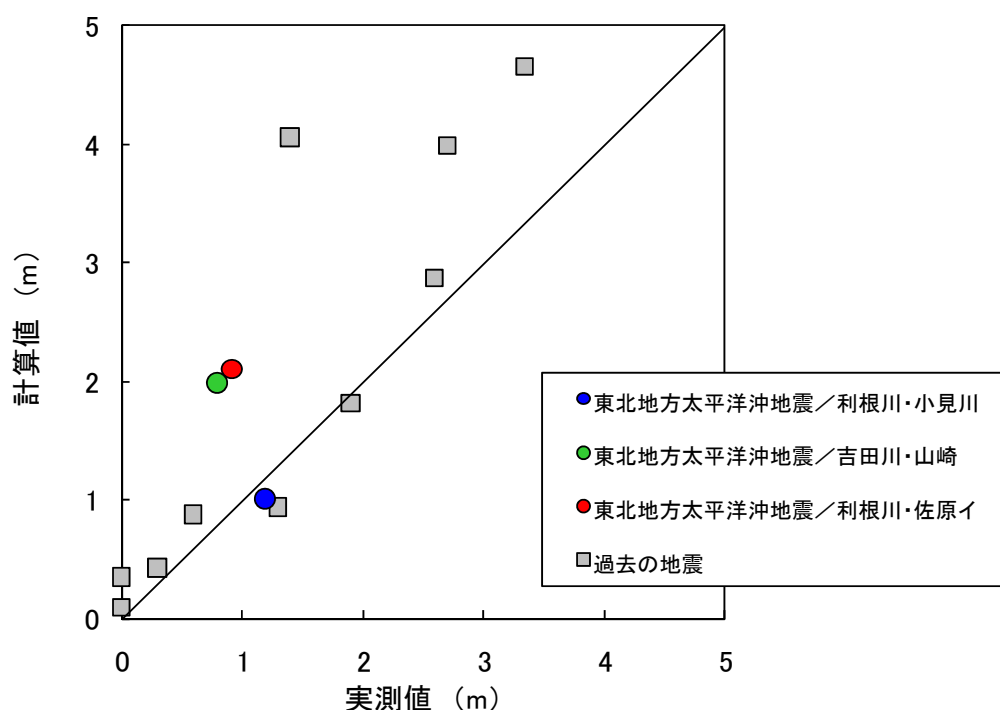
国土交通省 より引用

※関東地方の 112 箇所（液状化発生箇所とその周辺の非液状化箇所で判定に必要なデータが得られる箇所を選定）を対象にした、実際の液状化発生状況と今回の地震外力による液状化判定結果の比較。

※「液状化しない（ $FL > 1$ ）」と判定される箇所で液状化が発生した箇所（●）はなかった。

図-16 液状化発生の有無と液状化判定結果

- 今次の地震において基礎地盤の液状化によって被災を生じたと推定される箇所のうち、代表的な箇所において、指針（案）に示されている、基礎地盤の液状化による堤防の沈下量を静的な手法で算定した値（計算値）と、実際の沈下量（実測値）を比較したところ、実測値に比較して計算値が大きく算出される傾向があるものの、その関係は過去の地震における検討結果の傾向と著しく大きな違いは認められなかった（図-17）。



※今次の地震における基礎地盤の液状化による被災箇所と推測される3箇所（利根川：小見川、佐原イ、吉田川：山崎）において、ALIDを用いた計算値と実測した沈下量を比較した。
 ※外力は被災箇所直近のK-Net観測所（佐原）や国総研強震観測所（小見川、山崎）の地震動を用いた。また、堤防土質構造は、地震後のボーリング調査結果（利根川：小見川、佐原イ）や地震計設置時のボーリング調査結果（吉田川：山崎）に基づきモデル化した。
 ※過去の地震は、北海道南西沖地震や兵庫県南部地震等を対象としている。

過去の地震：豊田耕一，石原雅規「自重解析による河川堤防の地震被害事例の解析」

第60回土木学会年次学術講演会講演概要集，2005.9.より引用

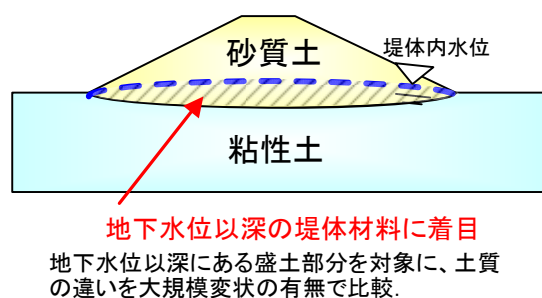
図-17 計算沈下量と実測沈下量の関係

- 従って、指針（案）に規定された基礎地盤の液状化を対象とした耐震性能照査は、現状では実用上妥当なものと考えられ、当面の照査の緊急性に鑑みると、今次の被災を踏まえて直ちに手法を改める必要はないと考えられる。
- ただし、指針（案）に示されている基礎地盤の液状化による沈下・変形量を静的に算定する方法は、実用的ではあるものの、工学的には多くの課題を有している。また、今次の地震のような長い継続時間の地震動の影響を直接的には反映していないこと等を踏まえると、地震時の堤防の変形解析の精度向上に向けて更なる研究を進める必要がある。
- また、堤防のみならず、多くの構造物の耐震性能照査に利用されている現行の液状化判定法（FL 法）については、地震動継続時間の影響等について更なる研究を進め、液状化判定法の高度化を目指していく必要がある。

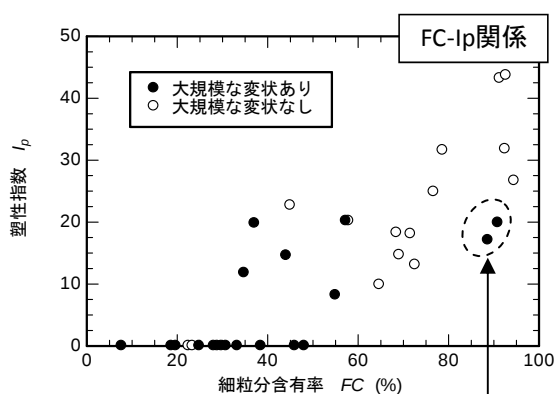
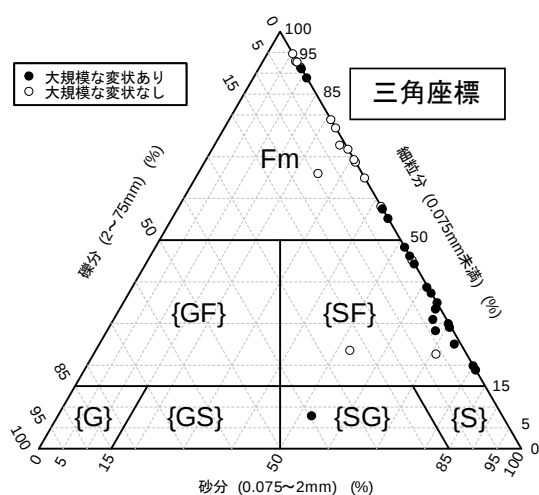
(3) 堤体の液状化に対する照査

- 従来の堤防の耐震性能照査では、堤体の液状化には主眼が置かれていなかったが、今次の地震において、堤体の液状化による大規模な堤防の沈下、変形が多く生じたことから、堤体の液状化を対象とした耐震性能照査を行う必要がある。
- 堤体の液状化現象は、堤体材料の地震時変形特性が大きく影響すること等から、指針（案）に示されている基礎地盤の液状化を想定した算定方法を適用するには、変形メカニズムを十分に解明した上で、さらなる検証が必要である。
- 堤体の液状化による沈下、変形を定量的に評価する変形解析手法を提案するには検証に時間を要するが、耐震性能照査の緊急性に鑑みると、基礎地盤の液状化による沈下、変形の照査とは別に、当面の照査に適用する方法を検討する必要がある。

- 今次の地震の堤体の液状化による被災箇所の調査結果によると、被災箇所の堤体材料として低塑性の細粒分を含んだ砂質土が多い傾向や、被災区間の堤体内水位が無被災区間に比べて高い傾向が見られる（図-18）。



検討対象とした地区（計19地区）	
河川名	地先名
阿武隈川	野田, 坂津田, 枝野, 小斉
鳴瀬川	砂山, 木間塚, 和多田沼, 下中ノ目下流, 下中ノ目上流
吉田川	大迫上志田下流, 大迫上志田上流
江合川	上谷地, 中島乙, 平針下流, 平針上流, 洩尻下流, 洩尻上流, 福沼
新江合川	榆木



細粒分の多い土質で大規模な変状があった箇所については、本格復旧を行う際に断面を観察する事により、液状化した土層の精査を行う予定である。

※東北地整管内で堤体の液状化により被災した箇所と近傍の無被害箇所において、堤体内水位以深の堤体材料をサンプリング、土質特性について分析を行った。
※無被害断面に比べ、被害断面の飽和域の土質は細粒分が 50%以下のものが大半である。ただし、細粒分が多いものでも、塑性指数 I_p が 0~20 の範囲にあるものは、大規模な変状を生じているものが多い。

図-18 堤体の液状化被災箇所における堤体材料の土質特性

- このような事実を踏まえ、堤体の液状化による沈下・変形の判定には、堤体材料、堤体内の水位、圧密沈下による堤体のめり込み量、基礎地盤の条件等について、今次の地震における被災程度との関係を分析した上で、堤体の液状化による沈下・変形の発生の有無等を検討することが必要と考えられる（図-19）。

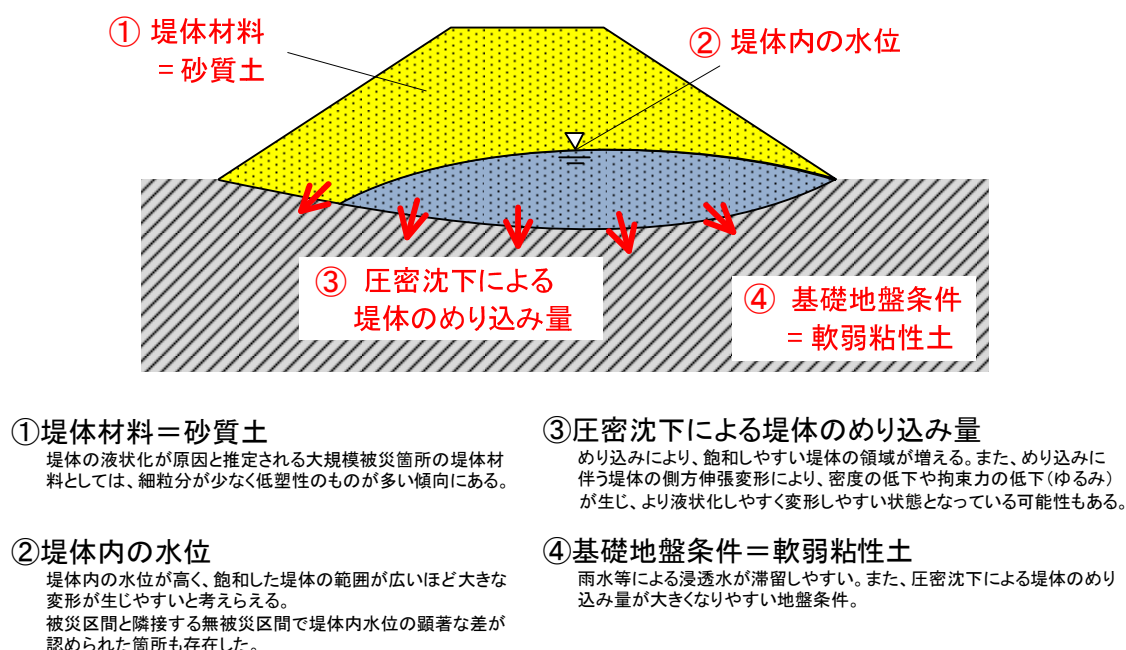


図-19 堤体の液状化の照査における着眼点

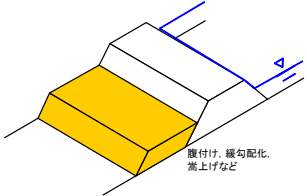
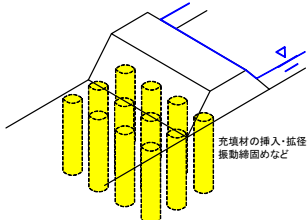
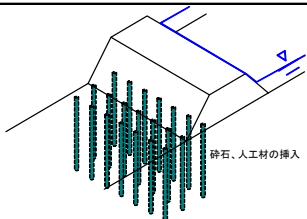
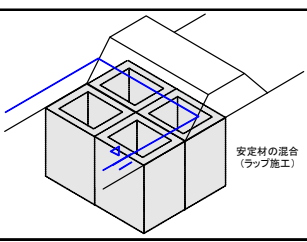
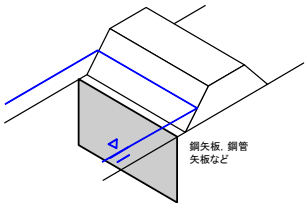
- 堤体の液状化に対する照査にあたっては、堤体の液状化の可能性の高い区間の、堤体材料、基礎地盤の土質、堤体内の水位を的確に把握することが必要である。まずは、浸透を対象とした堤防の詳細点検の際に地盤調査を実施している場合や堤防の天端の補修履歴等が存在する場合には、これらの成果を活用する。しかし、既存の地盤調査で堤体内の水位が適切に把握できていない場合や、近傍に既存のデータがなかったり、不足する場合には、新たにサウンディングやボーリング等を実施し、堤体材料や密度、基礎地盤の土質、堤体内の水位を的確に把握する必要がある。特に、堤体内の水位を的確に把握するためには、ボーリングによる場合では初期の水位を確認できるまで無水掘りとする等の配慮が必要である。

- また、堤体内の水位は降雨により上昇し、堤体の液状化による被災の発生の有無や被災の程度に影響を与えると考えられるが、堤体内の水位が著しく上昇するような洪水と地震が同時生起することはまれと考えられる。そこで、当面の耐震対策として堤体の液状化の検討を行う条件としては、平常時の堤体の湿潤状態を考えれば良い。
- なお、これまでに基礎地盤の液状化による沈下、変形を対象とした照査を実施済みの区間においても、堤体の液状化による沈下、変形を対象とした照査は実施されていないことから、基礎地盤の液状化を対象とした照査とは別に、照査対象全区間において、堤体の液状化による沈下、変形を対象とした照査を実施する必要がある。

4. 耐震対策工の検討

(1) 基礎地盤の液状化に対する対策

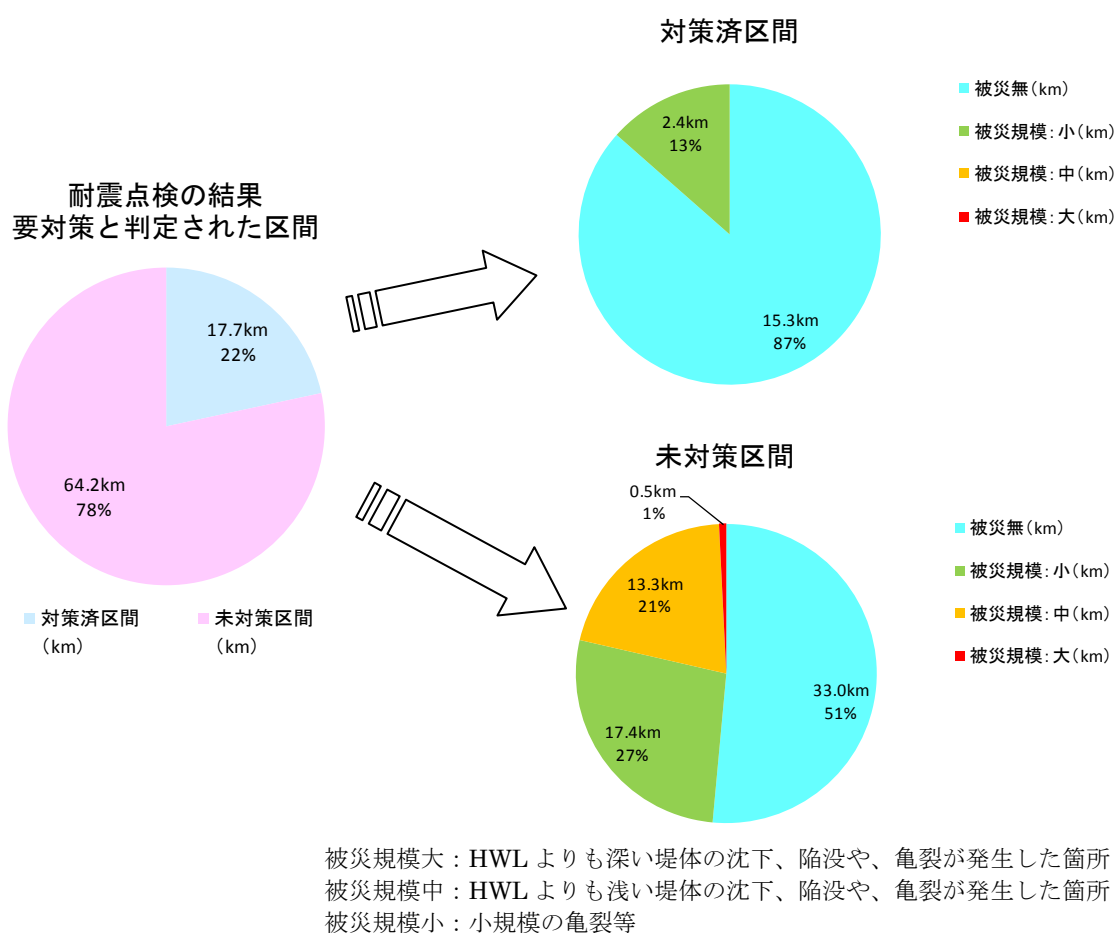
- これまでに既設堤防で施工されてきた基礎地盤の液状化による沈下・変形に対する対策工は、地盤の上載圧を増加させる工法、堤体のり尻の液状化発生を抑制する工法、堤体のり尻の側方変位を抑制する工法があり、レベル1地震動に対して震度法で設計されている。既設堤防では、堤体直下での施工が困難であることから、川表や川裏のり尻部に対策を施している事例が多い(図-20)。

対策工法		イメージ図
①地盤の上載圧増加	押え盛土工法	 腹付け、緩勾配化、嵩上げなど
②堤体のり尻の液状化発生抑制	締固め工法	 充填材の挿入・振逐、振動締固めなど
	間隙水圧消散工法	 砕石、人工材の挿入
③堤体のり尻の側方変位の抑制	固結工法	 安定材の混合(ラップ施工)
	鋼材を用いた工法	 鋼矢板、鋼管矢板など

「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案) H9.2 建設省土木研究所」をもとに作成

図-20 基礎地盤の液状化に対する主な対策工

- レベル1地震動に対する安全性が不足していると判断され、これまでに基礎地盤の液状化による沈下・変形に対する対策工が施工された堤防では、今次の地震において、大規模な変状は確認されていない。一方、レベル1地震動に対する安全性が不足していると判断されたにもかかわらず対策が未施工であった堤防では、大規模な被災を生じている例も見られた。このことより、これまでに施工された対策工は、今次の地震において一定の効果を発揮したものと推測される（図-21、図-22）。



※関東、東北地方における主要被災河川（利根川下流、江戸川、中川、小貝川、霞ヶ浦、北上川、鳴瀬川、名取川）を対象とし、レベル1耐震対策が必要とされる区間（L1 要対策区間）について整理した。

図-21 レベル1地震動に対する要対策区間における
今次地震での堤防の被災状況

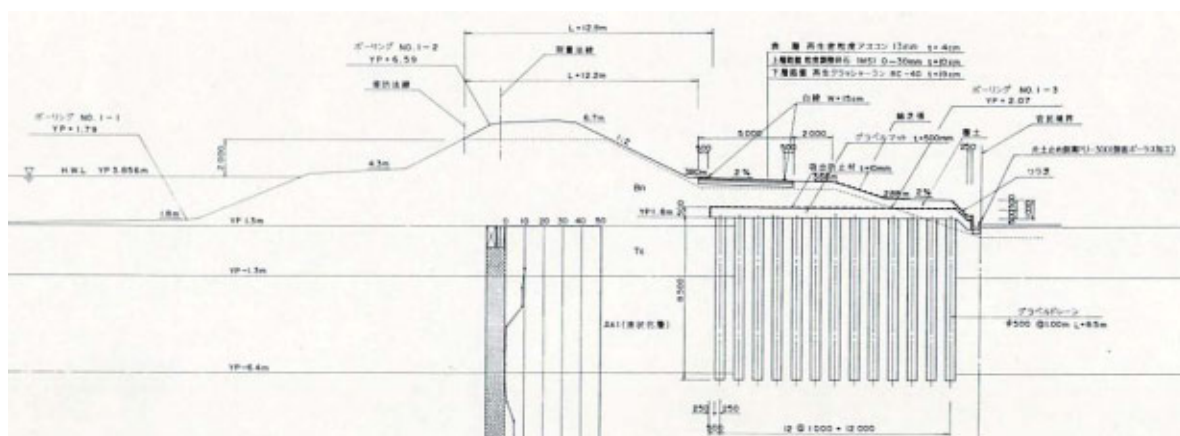
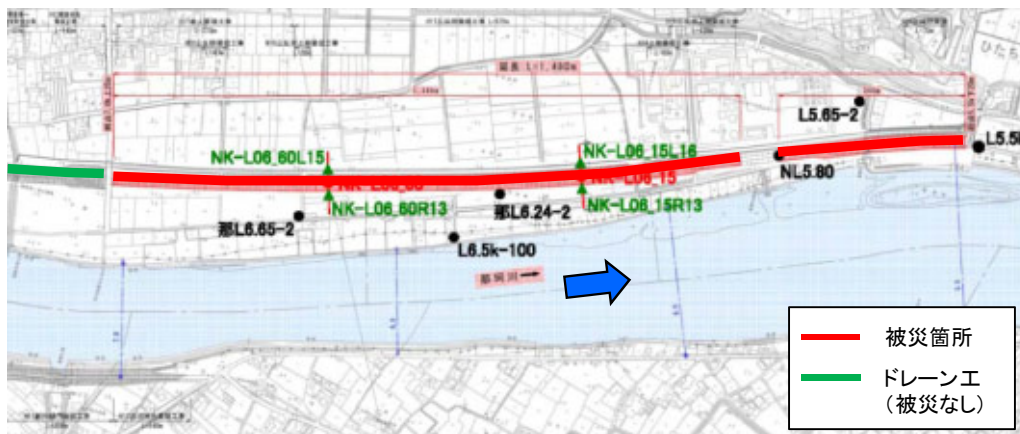


図-22 レベル1地震動に対する対策施工箇所における耐震効果の例
(利根川 右岸 27.75k-51m~28.0k-1m (小見川地区))

- このような事実を踏まえ、レベル 2 地震動に対する当面の基礎地盤の液状化による沈下・変形に対する対策工としては、これまでに施工されてきた実績のある対策工（工法、規模）を当面の主要な手段とし、レベル 2 地震動に対する具体的な設計方法を確立し、対策を行っていく必要がある。

(2) 堤体の液状化に対する対策

- 堤体の液状化による沈下、変形に対する対策としては、「堤体内の水位を低下させる対策」、「堤体の強度を向上させる対策」、「液状化の発生は許容するが堤体の変形を抑制する対策」が挙げられる。ただし、既設堤防においては、堤体内の水位を完全に除去すること及び大規模な開削を伴うことなく堤体の下部の強度を向上させることは極めて難しい。
- 堤体内の水位を低下させる対策の一つとして、浸透対策として一般的に施工されているドレーン工が一定の効果を発揮すると推測される。加えて、ドレーン工は、堤体のり尻部の材料が、せん断強度の大きいドレーン材に置き換わるため、堤体が液状化した場合にもその沈下、変形を抑制する効果が期待できる。また、浸透対策としてドレーン工が施工された堤防では、今次の地震において大規模な沈下、変形は発生していない（図-23、図-24）。
- 従って、既設堤防における堤体の液状化による沈下、変形に対しては、当面、「堤体内の水位を低下させる対策」等としてドレーン工が主な対策になると考える。
- ドレーン工の設計、施工にあたっては、堤体内の水位を十分に低下させるよう堤防の形状、土質構成、堤体内の水位を考慮してドレーン工の規模や設置深さ、堤脚水路の設置高を設定する必要がある。ただし、現状では、ドレーン工の効果について定量的な分析ができていないため、今後、事例の詳細な分析や模型実験による検証結果を踏まえてドレーン工の設計について検討する必要がある。
- ドレーン工により堤体内の水位を十分に低下させることが困難と判断される場合には、押え盛土等、「液状化の発生は許容するが堤体の変形を抑制する対策」により堤体の沈下、変形を抑制する対策を検討する必要がある。



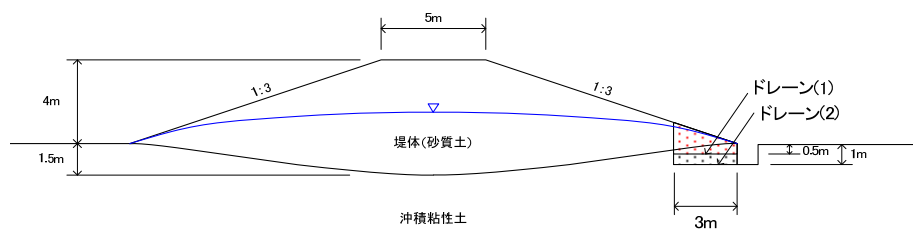
ドレーン工施工箇所と被災箇所の位置関係（平面図）



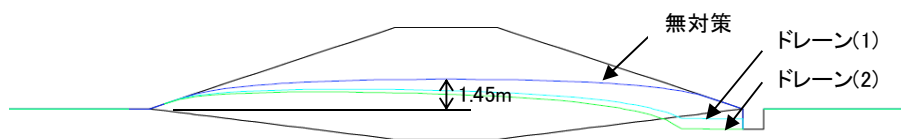
被災箇所の状況

※那珂川左岸 7.0k～8.75k ではドレーン工が施工されており、今次の地震では被災が無かったが、下流側に隣接する左岸 5.5k+20m～7.0k+25m では、無対策であり、堤防の亀裂等の大規模被災が発生した。

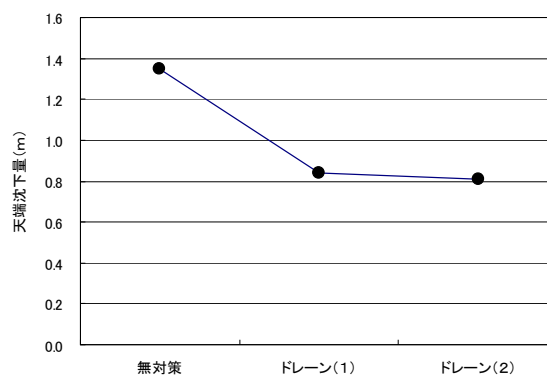
図-23 ドレーン工施工箇所における堤体変形抑制の例
（那珂川左岸 7.0k～8.75k）



解析モデル



浸透流解析結果



変形解析結果：堤防天端沈下量の比較

※堤防高 4m、3 割一枚のりの砂質土堤防が粘性土の基礎地盤上に築堤された場合を想定し、ドレーン工により堤体内水位を低下させた場合の変形量を、ALID を用いて解析した。
 ※ドレーン工を施工しない堤体、ドレーン工を施工した堤体（敷高を GL-0.5m と GL-1.0m の 2 種）に対して降雨を与え、堤体内水位が最も高くなる定常状態になるまで飽和一不飽和浸透流解析を実施、その後 300gal の地震動を与え、ALID により変形量の解析を行った。
 ※ドレーン工を施工した場合、沈下量が軽減される。

図-24 ドレーン工による地震時の変形抑制効果（解析例）

(3) 留意事項

- 耐震対策工を堤防に施工する際には、堤防に本来求められる機能の1つである耐浸透機能を低下させることがないように配慮する必要がある。耐浸透機能を低下させる対策の例としては以下が挙げられ、原則として避けなければならない。しかし、作業スペースや用地の問題でやむを得ず適用する場合には浸透対策の基本に基づき、例えば、堤防の安全性を損なわないようにドレーン工等の他の工法を併用する措置が必要である。

(耐浸透機能を低下させる耐震対策の例 (避けるべき例))

- 川表側に、水を引き込みやすくするようなドレーンタイプ (グラベルドレーン等) を適用すること。
 - 裏のり尻付近で行き止まり型地盤を形成するような止水壁タイプ (固化工法、矢板工法等) を適用すること。
-
- 基礎地盤の浸透対策として川表側に止水矢板が施工された堤防では、矢板施工側で堤体変形が抑制されている事例もある (図-25)。

5. 今後の耐震対策の推進について

(1) 照査の推進

- 平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災において、淀川左岸下流の酉島地区の堤防が延長約2kmにわたり、最大3m沈下したこと等を契機に全国の直轄河川でいわゆるレベル1地震動を対象とした堤防の耐震性能照査が実施された。照査対象は、朔望平均満潮位+1.0mよりも堤内地盤が低い区間等約1,440kmであり、照査の結果、要対策とされた約340kmの堤防のうち、約170kmの堤防に対して対策が施工されたものの、残り約170kmの堤防は現在まで対策が施工されていない。
- 一方、レベル2地震動を対象とした堤防の耐震性能照査に関しては、指針（案）に基づいて実施されており、照査対象延長は約1,570kmにのぼるものの、これまでに実施された延長は約830kmにとどまっている。また、照査の結果耐震性能が不足しているとされた区間に対する対策工は現時点では施工されていない（図-26）。

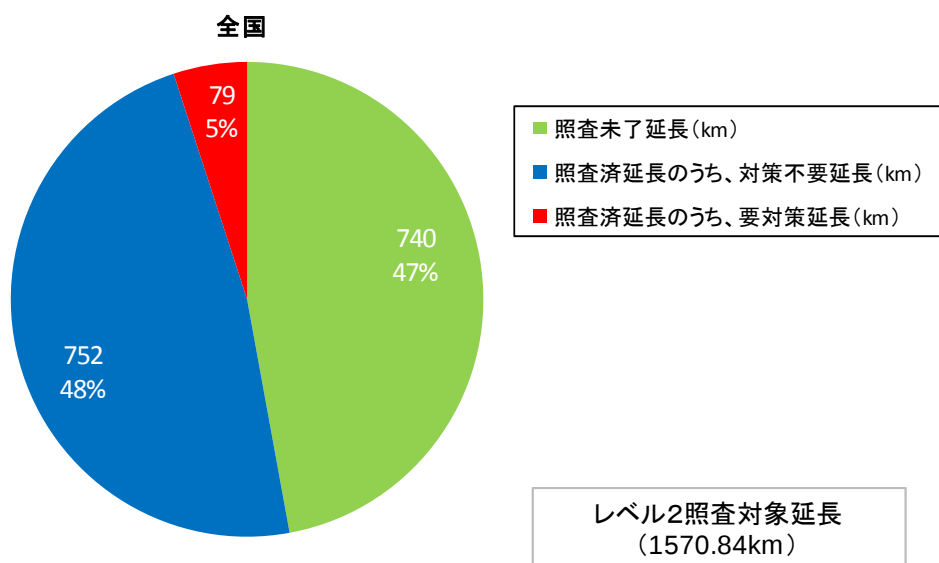


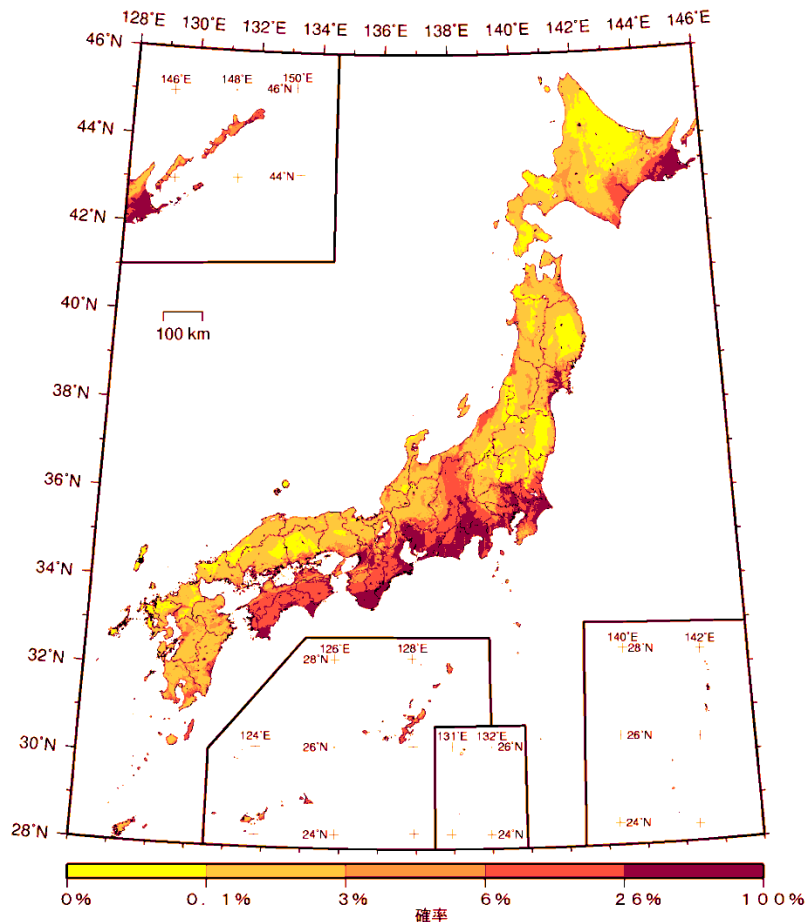
図-26 指針（案）に基づく耐震性能照査状況

- 今次の地震による堤防の大規模な被災と現在まで照査及び対策が進捗していない状況に鑑み、今後早急に照査を実施し、その結果に基づいて対策を行うことが必要である。その際、基礎地盤の液状化による沈下、変形に加え、堤体の液状化による沈下、変形も照査の対象に含めることが必要である。

- 堤防の耐震性能照査を効率的に実施することを目的として、平成 22 年 11 月に作成された「レベル 2 地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル(案)」については、堤体の液状化による沈下、変形を適切に反映できるよう必要な修正を行った上で、引き続き照査に活用することが必要である。
- 堤防の耐震性能照査は、地震により沈下、変形した後の堤防高と照査外水位を比較することを基本としており、地震に伴って津波が発生すると想定される場合には、津波高も考慮して照査外水位が決定される。「河川への遡上津波対策に関する緊急提言」(平成 23 年 8 月 河川津波対策検討会)等を踏まえて、各河川において、施設計画上の津波水位が新たに設定される場合等は、照査外水位が、既に設定済みの水位から変更となる場合もあるため、照査結果への適切な反映が必要となる。また、津波の遡上到達範囲によっては照査対象区間が上流側に延長となる場合もあることに留意する必要がある。
- 今次の地震においては、大規模な地殻変動により海岸や河川の河口付近を中心に広い範囲で地盤沈降が生じた。このため、堤防の耐震性能照査に当たっては、地殻変動による地盤沈降も含めて堤防の沈下量を設定する必要がある。地殻変動による地盤沈降については、中央防災会議や関係学会等における議論の動向を踏まえ、照査結果への適切な反映が必要である。

(2) 優先度を考慮した対策の推進

- レベル 2 地震動に対する耐震対策は今後進めるべき重要な課題となっているが、対策の対象となる全堤防に対して一律に事業を進めることは困難であることから、合理的に優先度を定めて、効果的、効率的に対策を推進する必要がある。
- 人口や資産が集中している地域は、地震後に洪水、高潮、津波等による浸水により甚大な被害が発生することが想定され、また、ゼロメートル地帯等地形上排水が困難な地域も被害が大きくなることが想定されることから、対策の優先度を検討するにあたっては被害の範囲や程度等の社会的影響度を考慮する必要がある。
- また、これまでの研究成果や知見により、大規模な地震は発生の確率に地域性があることがわかっているため、併せて、当該地域が強い地震に見舞われる確率を踏まえることが合理的である。(図-27)。



(モデル計算条件により確率ゼロのメッシュは白色表示)

確率論的地震動予測地図：確率の分布
 今後30年間に 震度6弱以上の揺れに見舞われる確率
 (平均ケース・全地震)
 (基準日：2010年1月1日)

出典) 地震動調査研究推進本部 HP より引用

図-27 強い地震に見舞われる確率の例

- この他、過去に地震により被災した堤防で、耐震性を考慮せずに復旧し、その後大規模な拡張等が行われていない堤防は、再び大規模な地震外力を受けた場合、沈下、変形を生じる可能性が高いと考えられるため、優先的に対策を実施する等の配慮が必要である。
- 断面を拡張する計画がある堤防において、基礎地盤の液状化に対する耐震対策が必要とされる場合は、確実な耐震効果が期待できる堤体直下の基礎地盤を改良する対策が効果的であることを踏まえ、断面拡張の前に実施可能な耐震対策を検討することが必要である。

(3) 危機管理対応

- 今次の地震では、津波による被害を中心に甚大な人的、物的被害が広域多方面に生じたことも影響し、沈下、変形した堤防の復旧については、これまでの地震による被災後の復旧と比較して時間を要した。また、耐震性能が不足している箇所に対する対策が完了するまでには、今後ある程度の期間を要することや対策が施工されても、大規模な地震が発生した際には堤防の沈下、変形が生じることも想定される。このようなことから、周辺市街地も含めた広範な被災及び出水期の被災も想定し、対策の施工状況も踏まえ、危機管理対応を準備しておくことも重要である。
- 例えば、今次の地震のような大規模な地震災害を踏まえ、地震動の強さとその範囲、堤防や背後地の条件等を参考に、様々なケースを想定した災害対応シミュレーション（災害時のシナリオ作成やそのシナリオを踏まえた机上検討）を各河川において実施する必要がある。その際には、大規模地震時の河川管理者の対応全般について検証し、各地域で想定される洪水に配慮しつつ、堤防の復旧に関して背後地の状況を踏まえた優先順位や工法等の検討、本復旧が完了するまでの水防体制及び情報提供体制等の検討を行う必要がある。
- また、シミュレーションの検証結果等も踏まえ、資機材の準備や水防対応等について計画的に実施する必要がある。なお、今次の地震では、度重なる余震による被害の拡大が確認されたことも踏まえ、余震による影響も考慮することが必要である（図-28）。

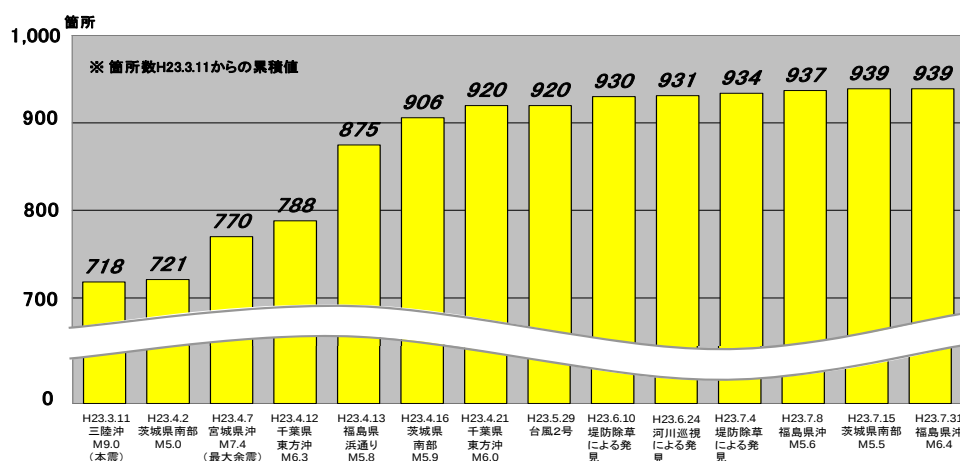


図-28 関東地方整備局管内における余震による堤防被災箇所の増大

- 大規模な地震が発生した場合、被災した一連区間の堤防は、緊急復旧の状態で出水期を迎える場合があるため、本復旧が完了するまでの間は、巡視・点検の強化、基準水位の見直しを含む河川管理および水防・避難体制の強化を検討する必要がある。なお、本復旧直後に出水期を迎える場合であってもそれらに準じた検討を行うことが望まれる。

6. 今後の技術研究の方向性

(1) 照査に関する課題

- 地震により大規模な被災が発生した場合には、地震における被災メカニズム等を把握する貴重な機会でもあることから、被災対応と同時に堤防の土質特性や地下水位等の所要の調査を十分に行うことが重要である。また、その調査手法についても、確実に精度の高い結果が得られるように事前の検討を行っておく必要がある。
- 現在の液状化判定法（FL 法）により液状化すると判定される地点においても、今次の地震において液状化が発生していない例が多く見られた。堤防の耐震性能照査の精度を向上させ、より効率的な耐震対策を実現するためにも、液状化強度に及ぼす地震動継続時間の影響等の解明と、液状化判定法の高度化が重要である。
- 今次の地震において、土構造物である堤防の被災が大規模かつ広範囲に渡った理由として、地震動の継続時間の長さが影響したと推測されるが、堤防の変形を静的に算定する手法では、今次の地震のような長い継続時間の影響は十分に考慮できないのが実状である。堤防の耐震性能照査の精度を向上させ、効率的な耐震対策を実現するため、長い継続時間の地震動が堤防変形に及ぼす影響の定量的な評価と、地震による堤防の変形解析の精度向上を行っていく必要がある。
- 今次の地震においては、堤体の液状化による大規模な被災が目立ったが、詳細な被災のメカニズムが十分に解明されているとは言えない。今次の地震による被災の分析等をさらに進め、堤体の液状化による被災のメカニズムの解明を進めていく必要がある。
- また、現在の地盤変形解析では、堤体の液状化による沈下、変形の定量的な評価には至っていないため、堤体の液状化の変形解析手法について、基礎地盤の液状化による変形と併せて解析するための手法等を検討していく必要がある。

- なお、堤体の液状化は、洪水時の降雨や河川水による堤体内の水位の上昇時に発生することも考えられるので、そのような状況における堤防の地震時変形についても検討する必要がある。
- 今次の地震において、軟弱地盤地帯では地震動の増幅があったことも推測されるため、各地点の地震動増幅特性を明らかにし、これらが堤防被害に及ぼす影響について検討を行っていく必要がある。

(2) 対策に関する課題

- 現在、耐震対策工の施工にはかなり大きな費用を要している。そのため、引き続き、効果的な対策工法・設計法の開発を進めていく必要がある。
 - 堤体の液状化対策として施工するドレーン工の耐震に対する効果は、現状では定性的に推測されているにとどまっており、その効果の定量的な把握とそれを反映した設計法の高度化が急がれる。
 - 堤体の液状化対策として既設堤防に実施するドレーン工より効果的な対策の開発が必要である。
 - 基礎地盤の液状化に対しても、低コストで効果的対策工の開発が必要である。
 - 河川堤防の築堤時においては、安価に耐震性の向上が図れるよう土工管理基準について検討を行うことも有効であると考えられる。
- レベル1地震動に対して設計された対策工がこれまでに施工されているが、それらのレベル2地震動に対する効果は、定量的には把握されていない。また、浸透に対する対策工の耐震面における効果についても現状では明確な評価できていない状況である。これまでに実施された耐震対策工及び浸透対策工のレベル2地震動に対する効果を定量的に把握するよう努める必要がある。
- 施工された対策工が当初期待された効果を発揮していることを確認するため、必要な箇所において強震観測、堤体内の水位観測等のモニタリングを継続的に実施することが必要である。

（３）危機管理対応に関する課題

- 大規模もしくは複合的な災害は、施設だけで防御することは不可能な場合も考えられるため、例えば、地震と洪水が同時に生起する災害を想定する等、施設での対応が不可能になると考えられるような災害時の対応を検討しておく必要がある。

河川堤防耐震対策緊急検討委員会

委員名簿

(敬称略)

委員長	東畑 郁生	東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻	教授
委員	岡村 未対	愛媛大学大学院理工学研究科	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	杉井 俊夫	中部大学工学部都市建設工学科	教授
委員	高橋 章浩	東京工業大学大学院理工学研究科	准教授
委員	中川 一	京都大学防災研究所流域災害研究センター	教授
委員	藤田 光一	国土交通省国土技術政策総合研究所	河川研究部長
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	地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム 上席研究員