

# 閉封飽和域の液状化による堤防被災過程 に関する研究

Study on the damage process of river levees by liquefaction in the levee body

佐々木康<sup>1</sup>・三浦高史<sup>2</sup>・成田秋義<sup>3</sup>・石戸谷信吾<sup>4</sup>  
・木村晃<sup>5</sup>・伊藤龍一<sup>6</sup>・中山修<sup>7</sup>・柳畑亨<sup>8</sup>・佐古俊介<sup>9</sup>

Yasushi SASAKI, Takashi MIURA, Akiyoshi NARITA, Shingo ISHITOYA,  
Akira KIMURA, Ryuuichi, ITO, Osamu NAKAYAMA, Tohru YANAGIHATA, Shunsuke SAKO

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 広島大学名誉教授 (〒105-0001港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ虎ノ門ビル7階)

<sup>2</sup>正会員 国土交通省 東北地方整備局 河川計画課 (〒980-8602 仙台市青葉区二日町9-15)

<sup>3</sup>正会員 国土交通省 東北地方整備局 河川計画課 (〒980-8602 仙台市青葉区二日町9-15)

<sup>4</sup>正会員 国土交通省 東北地方整備局 河川計画課 (〒980-8602 仙台市青葉区二日町9-15)

<sup>5</sup>正会員 国土交通省 東北地方整備局 仙台河川国道事務所 (〒982-8566 仙台市太白区郡山5-6-6)

<sup>6</sup>正会員 国土交通省 東北地方整備局 北上川下流河川事務所 (〒980-8602 石巻市蛇田字新下沼80)

<sup>7</sup>正会員 (財)国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ虎ノ門ビル)

<sup>8</sup>正会員 博(工) (財)国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ虎ノ門ビル)

<sup>9</sup>正会員 (財)国土技術研究センター 河川政策グループ (〒105-0001港区虎ノ門3-12-1 ニッセイ虎ノ門ビル)

River levees were damaged in widespread area from Tohoku (Northeast region) to Kanto by the 2011 Tohoku Earthquake. It was noticed that not a few sections of levees were damaged at sites where foundation ground is composed of soft cohesive soil layer during this occasion on the contrary to past experiences that damaged sections were often situated on loose saturated sandy ground.

In this paper, the cause and the process of damage to levees resting on soft compressible foundation are supposed from the results of open cut investigation at sites in the Abukuma and the Naruse Rivers, after reviewing the overview of characteristics of damage to the river levees in Tohoku area.

**Key Words :** 2011 Great East Japan Earthquake, damage to the river levees, liquefaction sections in the levees, levee open cut survey,

## 1. はじめに

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震により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た。堤防被災は、基礎地盤表層に緩い砂層が分布する箇所その他、基礎地盤表層が軟弱な粘性土で構成されている箇所でも生じたことが特徴である。

本論文は、東北地方直轄河川堤防で生じた堤防被災の特徴を概説し、阿武隈川枝野地区及び鳴瀬川下中ノ目上流地区で実施した堤防開削調査より基礎地盤表層

が軟弱な粘性土で構成されている堤防の液状化箇所を特定すると共に、堤体下部(閉封飽和域)の液状化による堤防被災過程について考察したものである。

## 2. 堤防被災の特徴

### (1) 河川堤防の被災概要

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、「今次地震」という。)により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た。



図-1 堤防被災範囲と大規模被災箇所<sup>1)</sup>

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5水系で1195箇所を上り、堤防被災箇所数は773箇所、延長は約98kmに及んだ。

図-1は、今次地震及び津波により堤防が被災した水系と被災範囲、決壊、陥没・沈下等の大規模な堤防被災箇所を示したものである。大規模被災箇所は29箇所及び、津波による被災箇所を除く22箇所が地震による被災であった。

宮城県内を流れる阿武隈川の右岸枝野地区、鳴瀬川の左岸下中ノ目上流地区における堤防被災状況を写真-1に示す。天端及びのり面に複数の縦断亀裂が生じており、堤体がブロック化して側方変動した被災形態となっている。また、天端の沈下及び川裏のり面のはらみ出しにより被災後の堤防はほぼ水平となっており、亀裂内には噴砂が確認されている。

## (2) 被災した堤防の土質特性

上述した地震による堤防被災箇所内、土質調査や地下水調査結果が得られている21箇所(大規模被災箇所19箇所、中規模被災箇所2箇所)のデータを基に基礎地盤及び堤体の土質特性について以下に整理した。

### a) 基礎地盤の土質特性

堤防天端で実施したボーリング調査及び標準貫入試験(N値)データより、21箇所の基礎地盤の土質別のN値ヒストグラフを作成し図-2に示す。対象とした基礎地盤の深度は約15m程度までである。基礎地盤を構



<阿武隈川右岸枝野地区><sup>2)</sup>



<鳴瀬川左岸下中ノ目上流地区><sup>1)</sup>

写真-1 今次地震による堤防被災状況

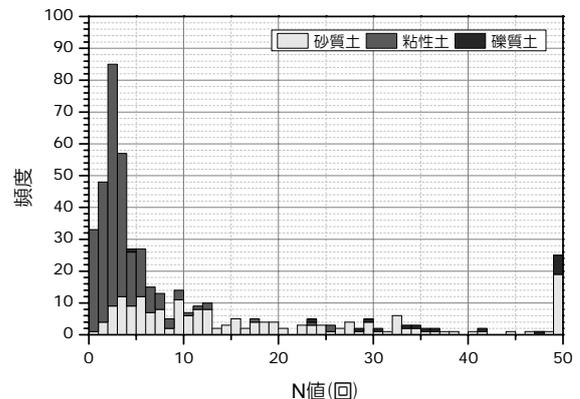
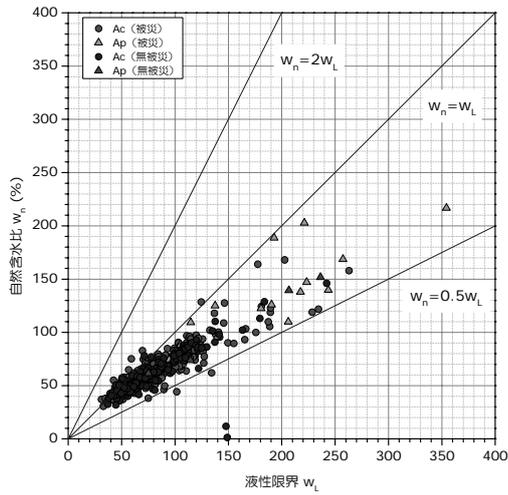


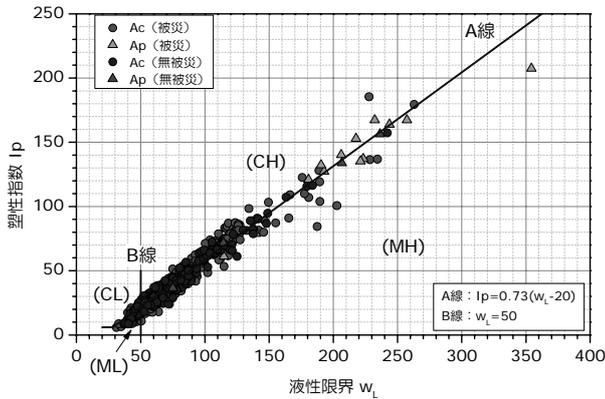
図-2 基礎地盤の土質とN値ヒストグラフ<sup>2)</sup>

成しているのは粘性土である箇所が多いことが分かる。これらの粘性土のN値は10以下が多く、一般的に軟弱地盤とされる3以下に該当する箇所も多い。一方、基礎地盤表層に砂質土が分布する箇所は12箇所存在し、これらのN値は幅広く分布するものの、15以下が多い。

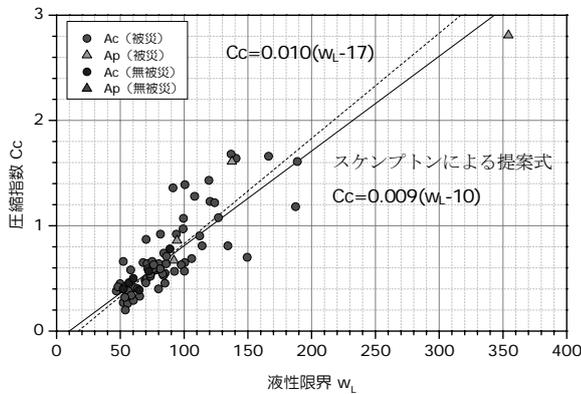
基礎地盤の粘性土について、自然含水比と液性限界、塑性指数と液性限界、圧縮指数と液性限界との関係を図-3に示す。図中には被災箇所近傍の無被災箇所でのデータも併せてプロットしている。粘性土は、自然含水比が液性限界と同等かそれ以下の状態であり、液性限界50%以上を示す圧縮性が大きい粘土に分類されるものが多い。なお、被災箇所と無被災箇所とで顕著な差は見られない。



(a) 自然含水比と液性限界との関係



(b) 塑性指数と液性限界との関係



(c) 圧縮指数と液性限界との関係

図-3 基礎地盤の土質特性 (圧縮特性) <sup>2)</sup>

また、圧縮指数はスケンプトン (Skempton 1970) による提案式から大きく外れるような特殊な粘性土ではなく、液性限界から圧縮指数が概ね推定できるような粘性土と考えられる。図中には最小二乗法により求めた圧縮指数と液性限界の関係式を示しており、スケンプトンの提案式に近似している。

### b) 堤体の土質特性

被災後の応急復旧は、写真-1 に示すような天端の沈下・陥没等の被災区間を土砂充填・成形し、上下流堤防と同形状に復旧している。従って、被災後に実施した

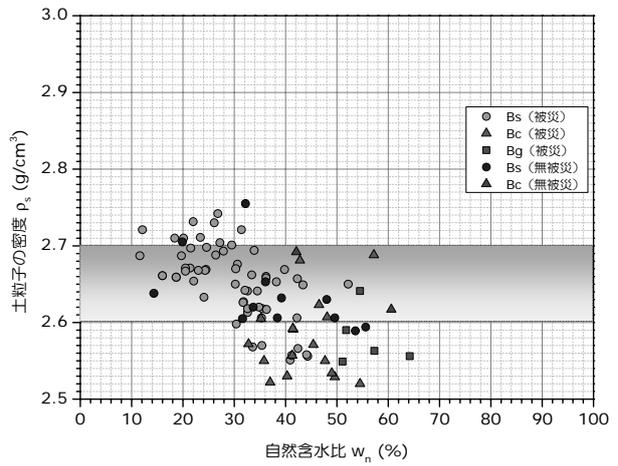


図-4 堤体下部材料の土粒子密度と自然含水比との関係<sup>2)</sup>

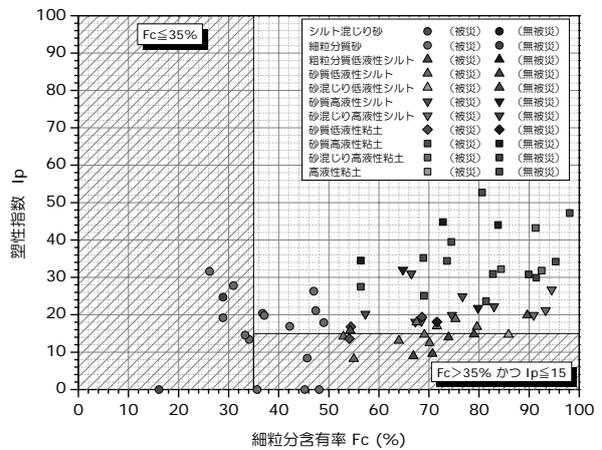


図-5 堤体下部材料の細粒含有率と塑性指数との関係<sup>2)</sup>

ボーリング調査やサンプリング調査では、応急復旧材料や元々その位置に存在していなかった堤体材料等を採用するような場合もあるため、本研究では、比較的地震前の状態で残っていると考えられる基礎地盤直上付近の堤体材料データを用いて分析を行った。

図-4 は堤体下部材料の土粒子密度と自然含水比との関係を示したものである。図中には、近傍の無被災箇所でのデータもプロットしている。被災した堤防の堤体下部には砂質土が多く存在し、その土粒子密度は通常の砂が有する 2.6~2.7 の範囲のものが多いが、自然含水比が 40%程度で土粒子密度が 2.6 程度以下となるような材料もみられる。保水性が高く、密度が小さいこのような材料は、火山灰質土と考えられる。なお、被災箇所と無被災箇所での顕著な違いはみられないものの、無被災箇所の堤体下部材料の土粒子密度は概ね 2.6 以上の範囲に分布している。

### 3. 堤防開削調査と得られた知見

今次地震による堤防被災の原因及び堤防の被災過程

表-1 開削調査結果の概要

	阿武隈川枝野地区	鳴瀬川下中ノ目上流地区
堤体と基礎地盤の境界面の形状	開削時に実施したサンディング(ジオスライサー)により、Ac1の上面が凹状であること、著しい変状がないことが確認された。	基礎地盤Ac1層の上面は川裏から天端に向かって凹状に下がっており、著しい変状は確認されていない(トレンチ堀により確認)
ブロック化した堤体及び堤体下部の状態	堤体部に生じた開口亀裂沿いに川表側法肩～天端舗装の基礎砂利(Bgs)が落ち込み、地表の亀裂が堤体下方に連続する状況が確認された。 少なくとも2箇所にて開口亀裂に伴う土塊の落ち込みが生じており、それらの落ち込みによって分断された堤体のブロック化を確認した。 また、サンプリング(ジオスライサー)により、堤体下部に液状化したと考えられる砂層が確認された。	堤体下部に液状化したと考えられる砂層が確認された。 上記砂層の厚さは乱れており、ブロック化した堤体下部が砂層にめり込んでいる状況が確認された。 なお、変形の少なかった川表側の堤体土は粘性土であることが確認された。
砂脈の方向及び規模	堤体ブロック境界部を上昇する砂脈が確認された。また、ジオスライサー調査では、飽和域に分布する暗青灰色砂層(Bs3)から上昇している砂脈が確認された。	堤体下部の液状化層と考えられる砂層と繋がった砂脈が確認された。砂脈は、堤体下部から川裏側に向かうものと、亀裂沿いに上方に向かうものが確認された。
地下水面の高さ	開削途中の壺堀により堤体内に地下水面が確認された(TP+15.750m)。その高さは、概ね堤内地盤高程度であった。	開削途中の壺堀により堤体内に地下水面が確認された(中央TP+14.45m,川裏TP+14.4m)。その高さは、概ね堤内地盤高程度であった(開削前の水位観測孔の水位はTP+15.4mであり、開削作業中に水位が低下した可能性がある)。

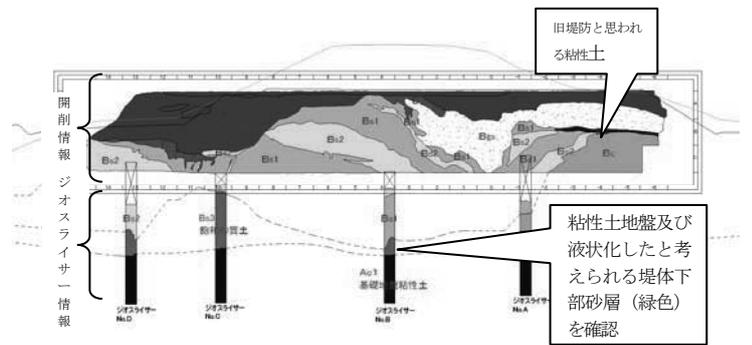


図-6(1) 枝野地区被災断面の開削結果(スケッチ「上段」とジオスライサー「下段の4本」の重ね合わせ)

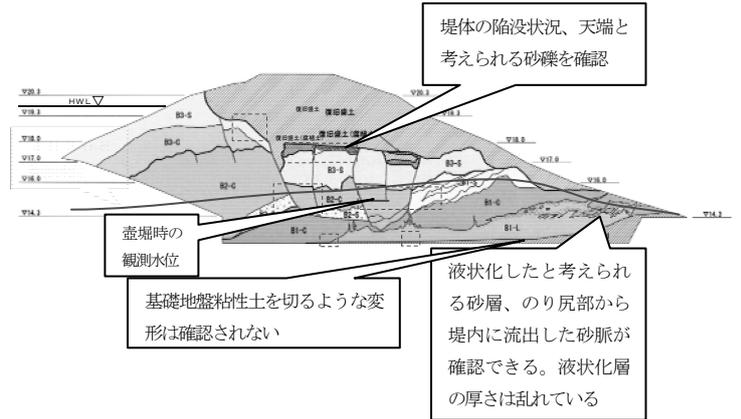


図-6(2) 下中ノ目上流地区被災断面の開削結果(上流側)

の解明のため、阿武隈川枝野地区及び鳴瀬川下中ノ目上流地区では被災堤防断面の開削調査を実施している。堤防開削調査では、点で実施するボーリング調査では把握し難い以下の事項を明らかにすることを目的とした。

- ・堤体と基礎地盤の境界面の形状
- ・ブロック化して沈下・陥没した堤体及び堤体下部の状態
- ・砂脈の方向及び規模
- ・地下水面の高さ

なお、阿武隈川枝野地区では地下水面下での開削調査が困難であったため、ジオスライサー(土層サンプラーの一つ)により土層断面の採取を行った。開削調査の結果について、地区別の概要を表-1に示し、開削断面のスケッチ等を図-6に示す。

以上の結果より、両開削調査箇所での堤防被災の主要因は、軟弱粘性土地盤上に砂質系材料を用いて築堤・拡張した堤体下部において、圧密沈下により堤体と基礎地盤の境界面の形状が凹状となり、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(以下、「閉封飽和領域」と言う。)、この領域が地震により液状化したものによると推定される。その結果、閉封飽和領域の剛性・強度が低下し、堤体の亀裂、陥没が発生すると共に、裏のり尻部から液状化層が噴出し、堤体の側方変動が生じたものと想定される。上述した閉封飽和領域と堤防変形を概念を図-7に示す。

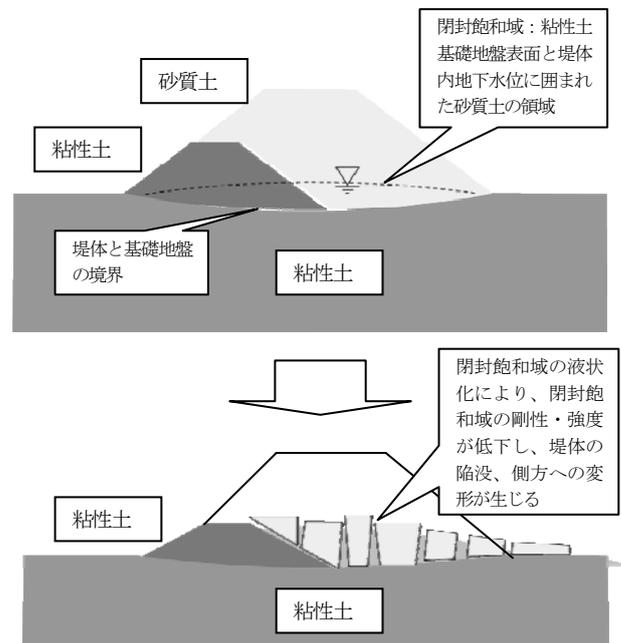
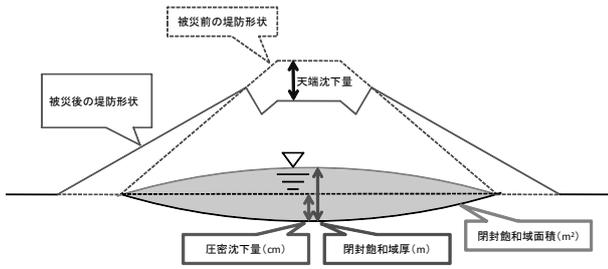


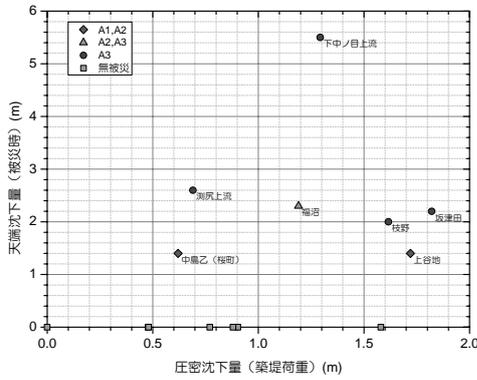
図-7 閉封飽和域と堤防変形概念図<sup>2)</sup>

#### 4. 堤防開削調査と得られた知見

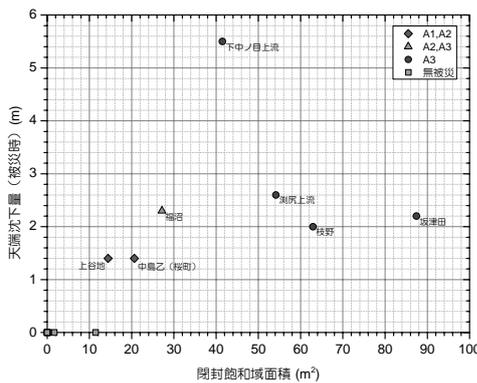
今次地震による堤防被災は、従来の堤防被災に多く見られた堤防基礎地盤の砂層液状化のほか、軟弱粘性土地盤



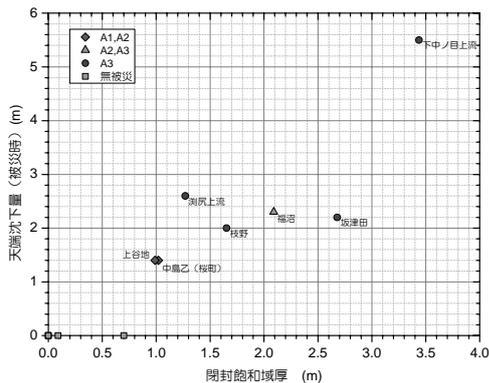
(a) 図中に示す各種諸量の定義



(b) 天端沈下量と圧密沈下量との関係



(c) 天端沈下量と閉封飽和域面積との関係



(d) 天端沈下量と閉封飽和域厚との関係

図-8 堤防沈下量と各種諸量との関係<sup>2)</sup>

上に築堤された堤体下部における閉封飽和域の液状化が主要因と考えられる。このため、閉封飽和域が堤防変

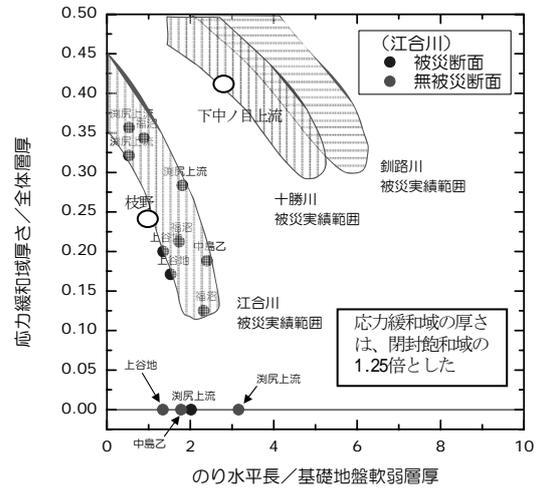


図-9 堤防の形状、基礎地盤軟弱層厚、閉封飽和域厚さと堤防被災との関係<sup>2)</sup>

形に及ぼす影響を確認するため、「基礎地盤の圧密沈下量」、「閉封飽和域の面積」、「閉封飽和域の厚さ」を指標とし、今次地震による天端沈下量との関係を被災箇所及び無被災箇所のデータをもとに整理した。その結果を図-8に示す。なお、上記の諸量は図-8(a)に示す定義であり、ボーリングによる堤防土質断面図及び地下水位観測結果より読み取ったものである。

まず、圧密沈下量と天端沈下量との関係をみると、圧密沈下量が大きくなると天端沈下量が大きくなる傾向を示すが、圧密沈下量が大きい箇所の中にも無被災（天端沈下量ゼロ）の箇所がある。これに対し、天端沈下量と閉封飽和域面積及び閉封飽和域厚との関係では、閉封飽和域面積が約15m<sup>2</sup>を越えると被災がみられ、閉封飽和域厚が約1mを越えると被災がみられる関係となっていることから、閉封飽和域の面積及び厚さが一定量を越えると堤防が被災しているという特徴がある。つまり、堤体下部材料が砂質土であることのほか、基礎地盤が圧密沈下され堤体内に地下水位を有する閉封飽和域が形成されたことが堤防被災の有無を分けた条件と考えられる。

図-9は、佐々木<sup>3)</sup>の成果を参考に、堤防の形状も考慮して堤防の高さ（天端部の基礎地盤上面から天端までの堤体層厚）、平均のり勾配のり面水平長、基礎地盤軟弱層の厚さ、閉封飽和域の厚さを指標として被災堤防との関係を整理したものである。図には、今次地震で被災した江合川堤防の被災実績範囲と阿武隈川枝野地区及び鳴瀬川下中ノ目上流地区堤防をプロットしている。また、併せて佐々木が示した1993年釧路沖地震における十勝川堤防と釧路川堤防での被災実績範囲も示した。

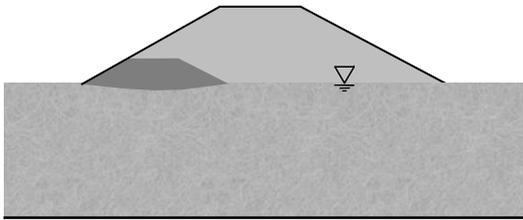
今次地震での被災実績範囲は、十勝川、釧路川での被災実績範囲に比べ左下の領域に分布する。これは、堤防層厚に対する閉封飽和域の厚さが相対的に小さかったこと、軟弱地盤層厚に対するのり面の水平長が短かったことのほか、堤防材料の違いや今次地震の特徴である長時間の地震動継続時間の影響が考えられる。

## 5. 閉封飽和域の液状化による堤防被災過程の推定

以上の結果を基に閉封飽和域の液状化による堤防被災過程を推定し下記に示す。粘性土の旧堤体を砂質土により嵩上げ・拡幅した堤体を想定したものである。

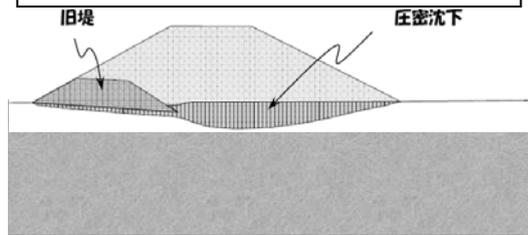
### a) 築堤初期の段階

粘性土で築堤された旧堤があり、砂質土により嵩上げ・腹付けして現在の堤防形状になった断面を想定している。



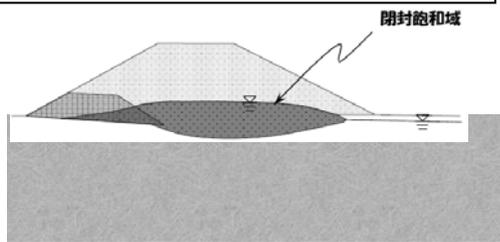
### b) 築堤による基礎地盤の圧密沈下の促進

堤体荷重と基礎地盤（粘性土）の圧密特性（層厚と体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。



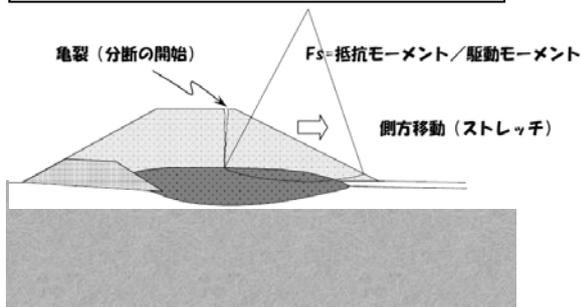
### c) 閉封飽和域の形成

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。



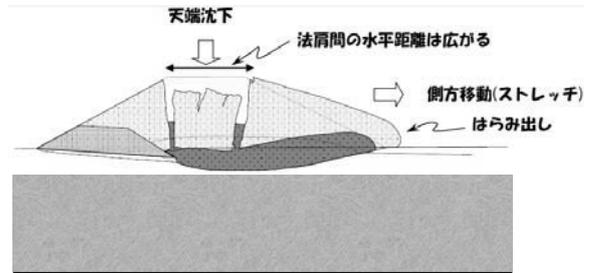
### d) 閉封飽和域での液状化の発生に伴う亀裂の発生

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）。



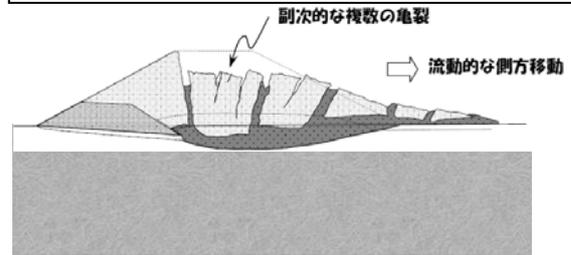
### e) 閉封飽和域の間隙水圧上昇に伴う変形の拡大

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。



### f) 閉封飽和域の間隙水圧上昇に伴う変形の更なる拡大

閉封飽和域が厚く、間隙水圧上昇の程度が大きければ、この部分は流動的に側方へ移動。（濃灰色に着色した部分は流動的な大変形をした飽和領域）



## 6. おわりに

本論文は、今次地震により東北地方直轄河川堤防で生じた堤防被災について、堤防被災箇所の基礎地盤及び堤体土質の特性を明らかにし、堤防開削調査の結果から得られた知見も加味して、被災の主要因と堤防被災過程を推定したものである。その結果、軟弱な粘性土基礎地盤上に築堤した堤体下部の閉封飽和域の液状化が被災の主要因であったことが明らかとなった。同様な堤防被災は、1993年釧路沖地震において泥炭地盤上に築堤された十勝川堤防や釧路川堤防等においても確認された事象である。

今後は、東北地方及び関東地方直轄河川堤防の本復旧時に得られた土質データや断面観察結果等の資料、過去に同様な被災形態を呈した堤防での各種調査資料等を加味し、閉封飽和域の液状化による堤防変形過程を深化させるとともに、予防対策としての効果的な耐震対策の設計方法について検討することが重要と考える。

### 参考文献

- 1) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：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，2003。
- 2) 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：北上川等堤防復旧技術検討会 報告書，2003。
- 3) 佐々木 康：地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するシンポジウム，地盤工学会，1998。

(2012.4.5受付)