

# 河川堤防の耐震化に関する研究

長田 仁<sup>1</sup>・佐々木 哲也<sup>2</sup>

<sup>1</sup>水管理・国土保全局 治水課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

<sup>2</sup>独立行政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ (〒305-0035 茨城県つくば市南原1-6)

東北地方太平洋沖地震によって広範囲に多くの箇所では河川堤防が被災した。これらの被災のうち、関東地方の代表的な被災事例と類型化した被災メカニズムを示す。また、今回の震災では堤体の液状化による堤防の被災等が問題となったことから、これらに対応した耐震照査手法の見直し等を行うにあたり実施した堤体の液状化による被災事例の分析や堤体の液状化に対する対策工の遠心模型実験を説明した上で、耐震性能照査・対策手法のポイントと今後の課題を示す。

キーワード 東北地方太平洋沖地震, 河川堤防, 液状化, 河川構造物の耐震性能照査指針

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、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。このうち大規模な被災箇所の原因は液状化であるが、従来から主に点検・対策の対象としてきた基礎地盤の液状化の他に、堤体の液状化が原因と考えられる箇所が多く確認された<sup>1)</sup>。

これらの被災を、堤体の液状化（堤体下部の飽和領域の形成メカニズムに着目し3類型に分類）と基礎地盤の液状化、堤体と基礎地盤の液状化が複合する場合の計5

類型に分類し、代表的な被災箇所とそのメカニズムを紹介する。

また、東北地方太平洋沖地震による河川堤防の被災メカニズムで特徴的な堤体の液状化に関して、被災事例分析や対策工に関する遠心模型実験を実施した。これらの結果を元に、平成24年2月に河川構造物の耐震性能照査指針・同解説の改定やレベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアルの策定等を行った。

## 2. 河川堤防の代表的な被災事例<sup>(例えば2)</sup>

### (1) 利根川・三和地先

利根川右岸70.5k-158m～71.0k（千葉県栄町三和）の延長633mにわたり天端から川裏小段にかけて沈下および複数の縦断亀裂が生じた。特に変状の激しいのは道路として利用されている裏小段であり、に示すように舗装面が傾斜しつつ沈下した。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や裏のり尻部の基礎地盤が隆起した箇所、階段工に大きな変状が見られた箇所もあった。

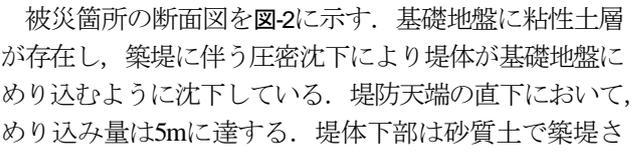
被災箇所の断面図をに示す。基礎地盤に粘性土層が存在し、築堤に伴う圧密沈下により堤体が基礎地盤にめり込むように沈下している。堤防天端の直下において、めり込み量は5mに達する。堤体下部は砂質土で築堤されており、地下水位はほぼのり尻高さに存在しているこ



図-1 利根川・三和地先の川裏小段沈下状況（関東地方整備局提供）

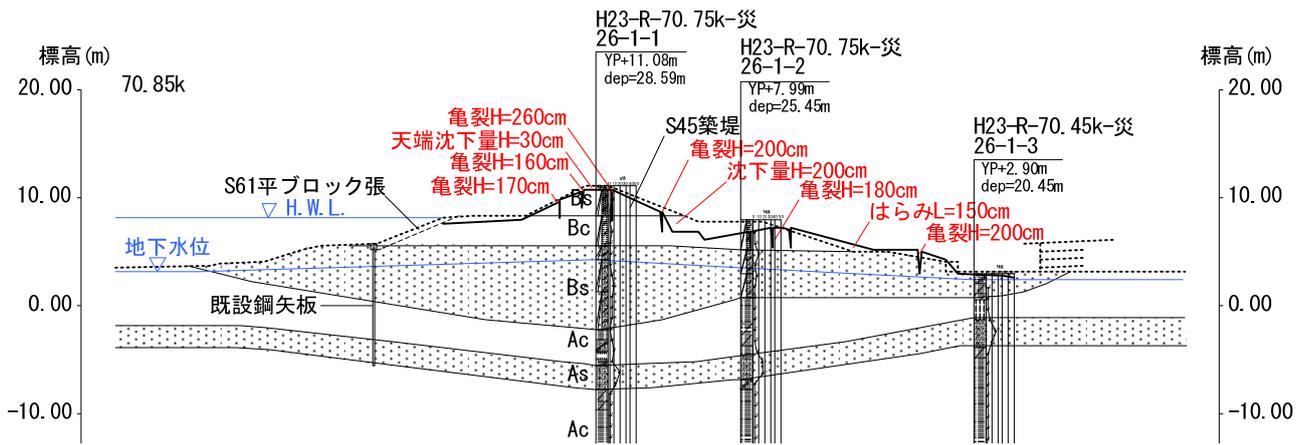


図-2 利根川右岸70.85kの断面図 (関東地方整備局提供資料に加筆修正)



図-3 江戸川・西関宿の被災状況 (関東地方整備局提供)

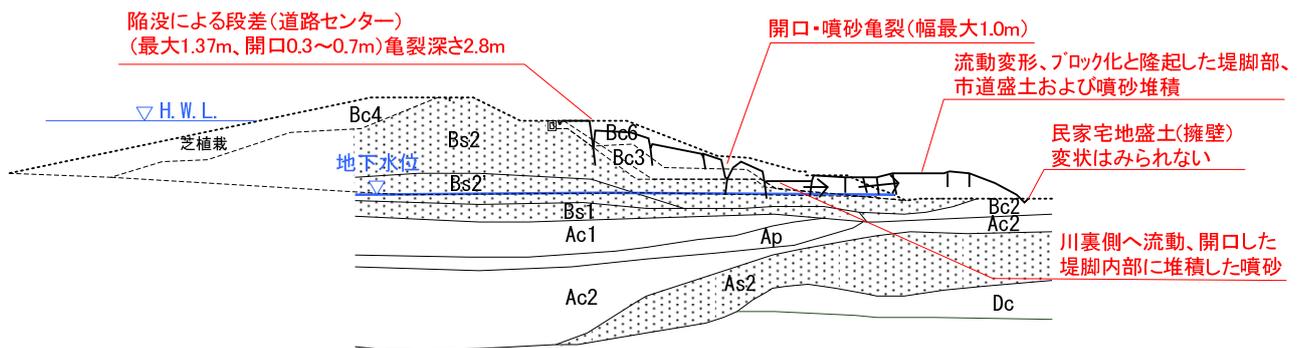


図-4 江戸川右岸 57.7k+15の断面図 (関東地方整備局提供資料に加筆修正)

とから、主に地下水位以下の堤体下部の飽和域が液状化したことにより変状が生じたものと考えられる。なお、川表側と川裏側の変状に大きな差異がある要因の1つとして、基礎地盤の浸透対策として設置されていた既設の鋼矢板の有無が考えられる。

## (2) 江戸川・西関宿地先

江戸川右岸 57.69k~57.8k (埼玉県幸手市西関宿) では、裏のりに段差および縦断亀裂が生じるとともに、裏のり尻付近の亀裂内部に噴砂痕が確認された。被災状況を図-3、断面図を図-4に示す。

川裏側の堤体下部には、下面が概ね下に凸の形状を有する暗灰色の中砂~細砂により構成される薄い砂質土層Bs1が存在する。上述のとおり、堤防の変状は川裏側に生じており、Bs1層のような液状化層は被災区間の川裏側以外には確認されていないことから、Bs1層が被害に関与し、裏のり尻の亀裂内部に溜まった噴砂の起源であると考えられる。

Ac1層は主として後背湿地性の粘性土層であると考えられ、旧版地形図によれば、本地点の被災区間は1883年では沼あるいは池であったことが明らかとなっている。これを埋めて造成するときの盛土がBs1層であると考えられる。特に、下に凸の旧水底面の形状が形成していたことが、浸透水を堤体下部に滞留させやすい堤防構造を形成していたものと考えられる。

このような堤体下部の飽和域の形成パターンは、利根川、小貝川においても見られた。

## (3) 涸沼川・下石崎地先

涸沼川左岸 7.5k+113~8.0k (茨城県東茨城郡茨城町下石崎) では、387mの被災区間の全長にわたり、天端の沈下、表のりの崩壊・はらみ出し、裏のりの縦断亀裂が生じた。液状化の痕跡である噴砂がのり肩に生じた亀裂開口部付近にまで達していた箇所もあった。被災状況を図-5、断面図を図-6に示す。なお、裏のり尻付近の道路には地震後に変状が見られなかったとのことである。ま

た、表のり尻から川側の Bg 層上面の形状は芦の繁茂が著しいこと等から十分に確認できていないが、顕著な隆起等の変状は確認されていない。このことから、堤防の変状は堤体下部で生じたものと考えられる。

旧版地形図によれば、本地点の背後地は昭和 10～20 年の間に干拓地として整備されており、この堤防は干拓堤防である。Ac 層は干拓前の自然地盤を形成していたと考えられる均質なシルトあるいは粘土であり、20m 以上の層厚を有する。Bsc および Bsnc は玉石混じりの砂あるいはシルトであり、土層構成から見ても噴砂の起源はこのいずれかであると考えられる。本地点では平常時より河川水位が表のり尻付近に位置し、地震後に部分開削を行ったところ、堤体下部に著しい水のしみ出しが見られた。また、川裏側の盛土下部に位置する Bsc の内部には均質な粘性土が存在する箇所もあり、堤体内水位の保持に寄与していた可能性が考えられる。

軟弱粘性土地盤上に築堤された堤防であり、築堤後の圧密沈下が堤体下部の飽和域の形成に影響した可能性も考えられるが、平常時の河川水位と開削時の水のしみ出し状況に鑑みると、平常時より河川水位が高く、のり尻から堤体下部に水が浸入しやすい状況が、堤体下部の飽和域の形成に影響を及ぼした最も大きな要因であると考えられる。堤防の変状が全延長にわたって川表側に向かって生じていたという事実からは、表のり尻付近の堤体内水位が高かったことが推察される。

#### (4) 那珂川・三反田地先

那珂川左岸 5.5k-20～7.0k+25（茨城県ひたちなか市三反田）では、480mの延長にわたり天端を中心に図-7に示すような複数の開口亀裂が生じた。横断面を図-8に示すボーリング調査結果によると、10m以浅は良く締め固まった砂層（As1層）が存在し、As1層とBs層の境界付近に地下水位が確認されている。また、堤内地側の農地では広範囲に噴砂が確認されている。以上より、主として基礎地盤のAs1層のうち比較的N値の低い上部が液状化したことが被災の原因であると考えられるが、地震時の地下水位の高さによってはBs層の下部も液状化した可能性がある。

#### (5) 利根川・歩地先

利根川左岸 67.25k-67～68.00k-25（茨城県河内町竜ヶ崎町歩）では、約600mにわたり天端やのり面に縦断亀裂が生じ、図-9に示すように天端が大きく沈下した区間もある。最も沈下した断面では、約1.9mに達した。川表側ののり面は全体的に川側に移動し、図-10に示すように川表側の小段には陥没が生じた区間も存在する。川裏側ののり面にも亀裂が生じてはいるが、川表側の変状に比べると相対的に軽微であった。

図-11に横断面を示す。基礎地盤の5m以深には、粘性土層が存在し、築堤に伴う圧密沈下により堤体下部が基礎地盤にめり込んでいる。地下水位は川裏側ののり尻高さ付近にあり、砂質土からなる堤体が広い範囲で飽和していたと考えられる。したがって、堤防の変状に、堤体の



図-5 澗沼川・下石崎の被災状況（関東地方整備局提供）



図-7 那珂川・三反田の被災状況（関東地方整備局提供）

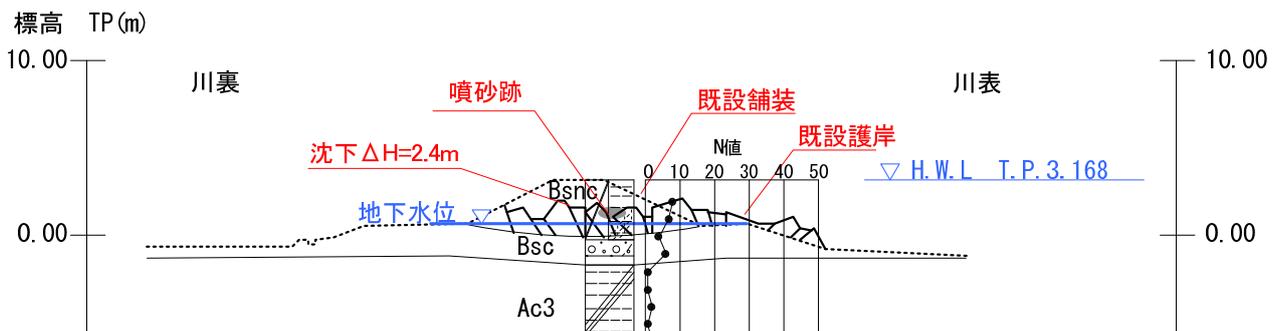


図-6 澗沼川左岸8.0kの断面図（関東地方整備局提供資料に加筆修正）

液状化が大きく影響したものと推定される。また、粘性土層の上には、As層やAsc層が存在し、いずれも地下水位よりも深い位置にあるため、液状化した可能性がある。ボーリング調査結果から、Asc層は横断方向に厚さと性状が変化していることが分かり、川裏側ほど薄く粘性分が増える傾向にあり、川裏側の被災程度が川表側の被災程度に比べ相対的に軽微であったことと整合するものである。これより、堤体の液状化だけでなく、Acs層の液状化も変状に寄与した可能性がある。このような堤体の液状化と基礎地盤の液状化が複合し、被災が発生するパターンが存在する。

### 3. 被災メカニズム

#### (1) 堤体の液状化による被災

東北地方太平洋沖地震に見られた事例<sup>2),3)</sup>を通じて、堤体堤体下部の飽和域形成パターンを類型化すると、次の3通りが考えられる<sup>4)</sup>。

#### a) 軟弱粘性土地盤の圧密沈下 (図-12)

軟弱粘性土地盤上に築堤すると圧密沈下が生じるが、断面方向の上載荷重の違いにより、堤体下部は下に凸の形状を呈する①。下に凸の形状に変形するとき、堤

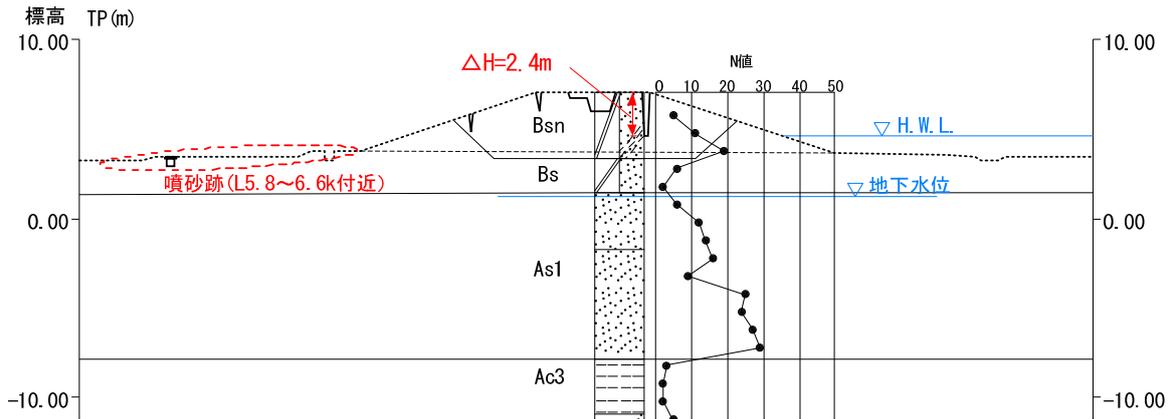


図-8 那珂川左岸6.15kの断面図 (関東地方整備局提供資料に加筆修正)



図-9 利根川・歩の天端の被災状況 (関東地方整備局提供)



図-10 利根川・歩の川表小段の被災状況 (関東地方整備局提供)

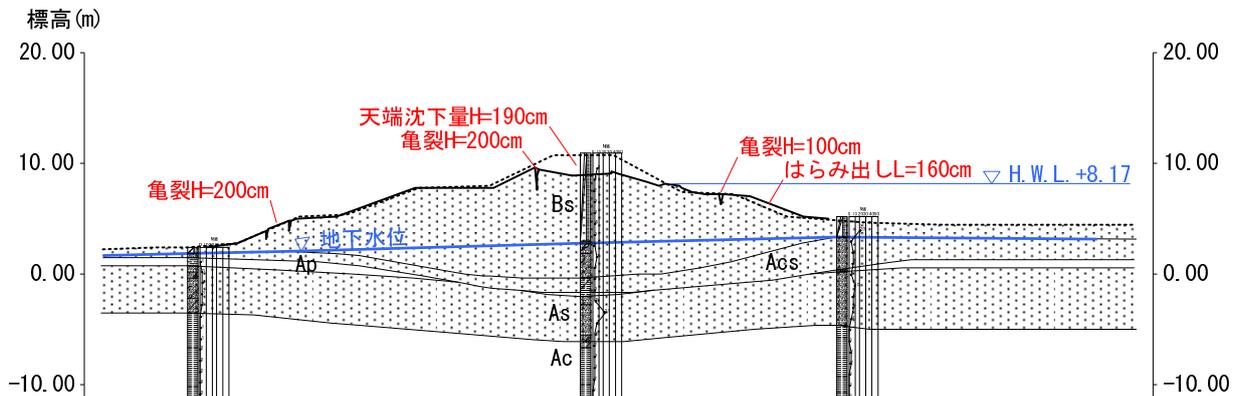


図-11 利根川左岸 68.0kの断面図 (関東地方整備局提供資料に加筆修正)

体土の下面の長さは伸び、また場合によっては基礎地盤側方変位が生じるため、堤体下部では水平方向に伸長変形し、ゆるみ（密度、拘束圧の低下）を生じる(②)。堤体材料が砂質土の場合、降雨等による湿潤化(③)の後、堤体内に浸透した間隙水が下部に達しても粘性土である基礎地盤には排水されないため、下部に飽和域を形成しやすい堤防構造となる(④)。なお、圧密沈下に伴って生じる堤体下部のゆるみが、液状化に伴う地震時の堤防の変形量に大きな影響を与えるとの研究報告例<sup>9)</sup>もある。

**b) 旧湖沼・旧河道の埋立て (図-13)**

旧湖沼・旧河道の水底の上面は下に凸の形状を成している(①)。これを埋め立てて築堤(②)することで、堤体下面が下に凸の形状となる。また、埋立て時には施工性の高さから液状化しやすい砂質土が使われ、地盤の地下水位が高く軟弱であるほど、埋立て時に十分な締固めを行うことが難しいことが推察される。このような地盤の上に築堤されると、降雨等により浸透した水が埋立て部分や堤体下部に溜まり(③、④)、下部に飽和域を形成しやすい堤防構造となる。埋立てによる土層が堤体の一部であるかどうかについては議論の余地も考えられるが、広義には、人工的に造成された盛土の液状化とみなすことができる。

**c) 平常時より河川水位が高いケース (図-14)**

表のり尻が常に水浸するほどに平常時の河川水位が高

い場合、堤体下部への河川水の浸透により飽和域が形成されやすい。特に、干拓堤防はこのような状況下に置かれている場合も多いと考えられる。上述した涸沼川の例では基礎地盤が粘性土であったが、表のり尻が常に水浸しているような堤防であれば、基礎地盤が必ずしも難透水性の土層から構成されていなくても、堤体下部に液状化を生じる可能性が考えられる。

**(2) 基礎地盤の液状化による被災**

基礎地盤の液状化による被災事例は東北地方太平洋沖地震以前から数多く確認されている。液状化層の過剰間隙水圧が上昇し液状化すると、堤体を支えられなくなり沈下する（液状化層は薄くなる）とともに水平方向に広がる。堤体は基礎地盤の動きに追随し、沈下や亀裂が生じる。基礎地盤が液状化した場合には、堤防周辺地盤で広範囲に噴砂などの液状化の痕跡が確認されることも多い。

基礎地盤の液状化層の中には、変状にあまり寄与していないのではないかと考えられる液状化層が見られる。図-2のAs層や図-4のAs2層、図-11のAs層が該当し、変状の主な原因と推測される液状化層よりも深い位置にある。このような深い液状化層の取り扱いによって、沈下量の予測や対策工の設計が大きく変わる。また、このような深い液状化層が実際に液状化していないのか、液状化し

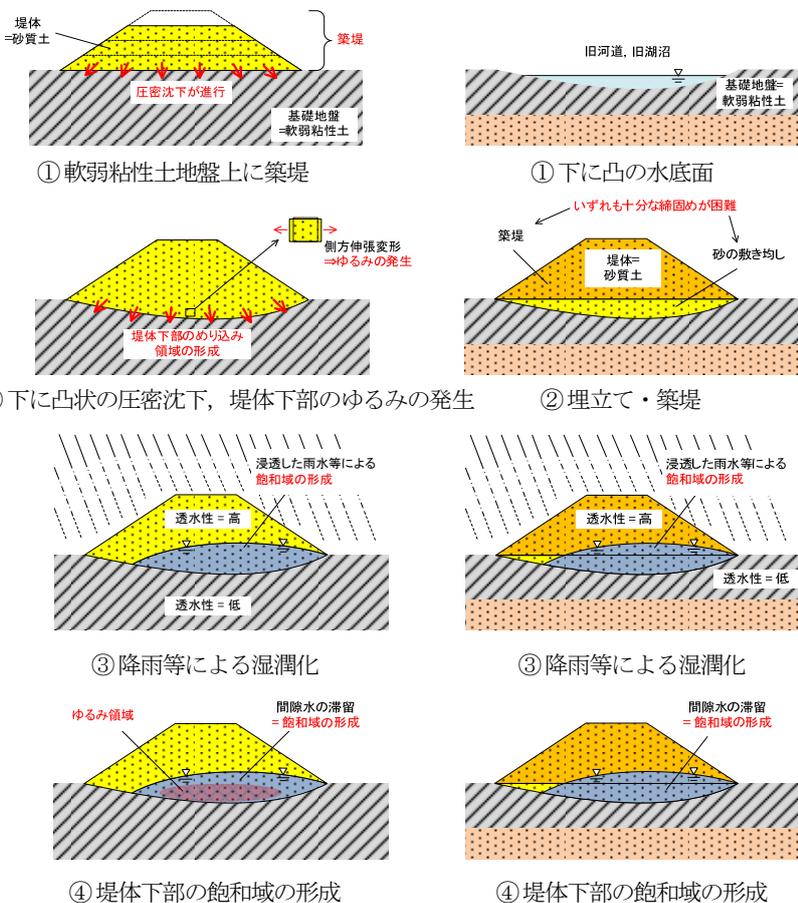


図-12軟弱粘性土地盤の圧密沈下による飽和域 図-13旧湖沼・旧河道の埋立てによる飽和域

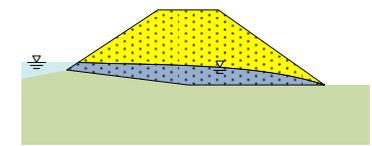


図-14 平常時の河川水位による飽和

ていたが変形しなかったのかなどの基本的なことについても不明な点が多く、今後の重要な研究課題であると考えられる。

### (3) 堤体と基礎地盤の液状化が複合したことによる被災

堤体と基礎地盤は、堤体の変状に寄与したと考えられる液状化層が、自然に堆積した地盤か人工的に作った盛土部分かで分けたものである。盛土部分の形状には、広範囲に埋立て（高上げ）した後に堤体を施工した場合や堤体部分しか盛土しなかった場合がある。また、堤体と基礎地盤の間の粘性土層の有無や圧密沈下によるめり込みの有無や程度などによって、堤体の液状化や基礎地盤の液状化の単独の被災形態とよく似た形状となる場合もある。

自然地盤と盛土では、年代効果や施工時の締固め、圧密によって沈下した場合には緩みや応力緩和など様々な影響から液状化のし易さや液状化後の変形に差異が生じるものと考えられる。しかし、これらの影響を設計に取り込む方法は確立されておらず、今後の研究課題である。

## 4. 堤体の液状化事例に関する定量的分析<sup>4)</sup>

東北地方太平洋沖地震における被災事例・無被災事例として、阿武隈川、鳴瀬川、吉田川、江合川、新江合川、利根川、江戸川、霞ヶ浦、久慈川、那珂川、涸沼川から計85断面を抽出し、被災程度と堤防諸元の関係について定量的な分析を行った。

各断面に対して、地震後の堤体および基礎地盤の変形・亀裂発生状況、噴砂の発生状況、土層構成、堤体内水位等の状況から総合的に判断し、①基礎地盤の液状化により被災したもの、②堤体の液状化により被災したもの、③堤体および基礎地盤の両者の液状化により被災したもの、④被災しなかったもの、のいずれかに分類した。ここでは、②に該当するケースと④のうち②に該当するケース近傍の無被災断面について、のり勾配、堤体土質、堤体内水位と被災程度の関係性を分析した。

### (1) のり面勾配と沈下量の関係

堤体液状化による被災事例を対象に、のり勾配  $n$  と沈下率  $S/H$  の関係を図-15 に示す。のり勾配  $n$  は、変状が生じた方ののり面における平均のり勾配を抽出したものであり、平均のり勾配は当該のり面のり肩とのり尻を結ぶ直線の勾配として求めている。また、両側ののり面に変状が見られる場合は、いずれか緩い方ののり勾配を抽出してプロットしている。

同図によれば、のり勾配が3割でも大きな沈下が生じた事例が存在するものの、4割であれば非常に小さな沈下率にとどまっていることが分かる。図-15の  $S/H = 3 \sim 5$  の範囲に見られる  $S/H$  の上限は、堤体下部に液状化が生じて、のり勾配が緩ければ変状が天端まで達しにくい

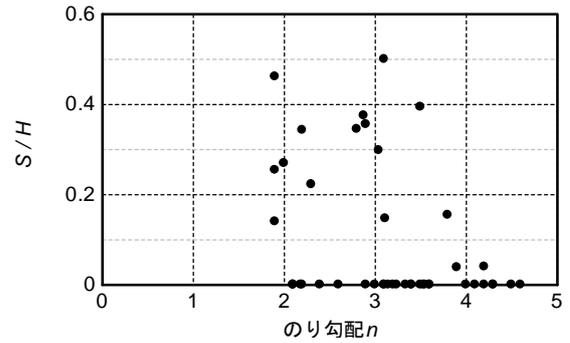


図-15 のり面勾配  $n$  と沈下率  $S/H$  の関係

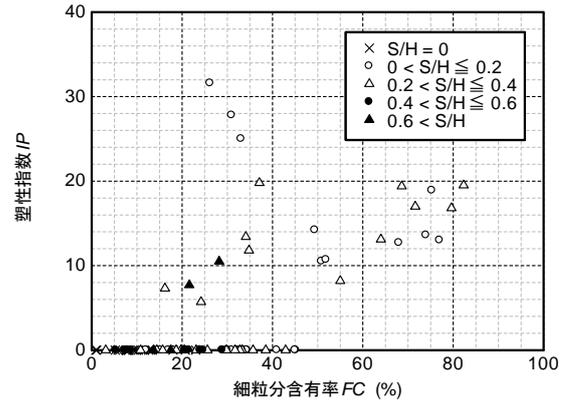


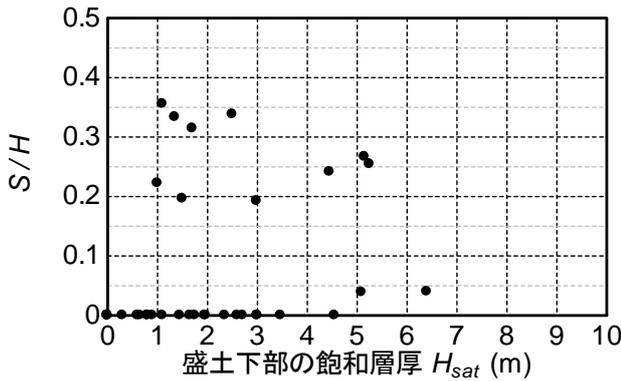
図-16 堤体下部の飽和域の細粒分含有率  $FC$ ・塑性指数  $IP$  と沈下率  $S/H$  の関係

傾向を示していると考えられる。

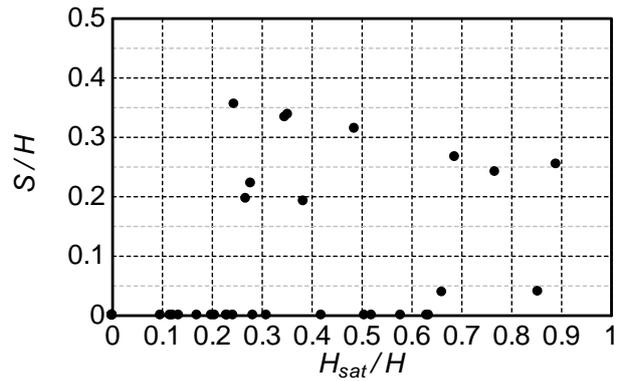
### (2) 堤体下部の飽和域の土質

特に変状に関与したと考えられる堤体下部の飽和域の土質を明らかにするために、変形、亀裂、噴砂の発生状況等から総合的に判断し、変状に関与した可能性が考えられる箇所を多めに抽出し、細粒分含有率  $FC$ ・塑性指数  $IP$  を沈下率  $S/H$  ごとにプロットした（図-16）。細粒分含有率  $FC$  は細粒分（0.074mm以下）の量、塑性指数  $IP$  はその材料が有する粘性の程度（細粒分の質）を概略表す指標と考えたものである。

点の多くは  $FC \leq 45\%$ 、 $IP = 0$  であり、非塑性の砂質土が変状に関与しているケースが多い。一方で、数は相対的に少ないものの  $FC \leq 35\%$  あるいは  $IP \leq 20$  の広い領域にも分布しており、現在の液状化判定<sup>7)</sup>の対象とされている  $FC \leq 35\%$  あるいは  $IP \leq 15$  よりも少し広い範囲の土質が変状に関与した可能性を示す結果となっている。しかし、堤体下部の飽和域が必ずしも厚くないため、1ボーリングあたり1深度程度の試料に対する試験結果であるケースが多い。このため、この数値が真に変状に関与した箇所の土質を十分に反映できていない可能性も考えられる。この点については、さらに詳細なデータの蓄積が必要である。



(a)  $S/H \cdot H_{sat}$  関係



(b)  $S/H \cdot H_{sat}/H$  関係

図-17 堤体下部の飽和層厚 $H_{sat}$ と被災程度の関係

### (3) 堤体下部の飽和層厚と沈下量の関係

堤体下部の飽和域の層厚 $H_{sat}$ が明らかになっている地点を対象に、 $H_{sat}$ と被災程度との関係を調べた結果を図-17に示す。堤体内水位をボーリングにより把握するにあたり、堤体を構成する砂質土の下方に難透水層が存在する場合、堤体下部の宙水が飽和域を形成しているケースが考えられるため、掘進時に難透水層を突き破ることによって宙水を逸失しないよう、調査は慎重に行われている。堤体下部の飽和層厚 $H_{sat}$ は断面内で飽和した盛土の厚さが最大となる位置での値とした。

同図からは、盛土下部の飽和層厚 $H_{sat}$ が1m、あるいは堤防高さとの比である $H_{sat}/H$ が0.24を下回れば、天端の沈下が生じていないことが分かる。水平成層地盤を例に考えると、粘性土地盤の圧密問題と同様に、地震動により飽和砂質土の過剰間隙水圧が上昇した後に水圧の消散に要する時間は、飽和砂質土層厚の2乗に比例する。ここで検討対象としている盛土下部の液状化の問題は水平成層地盤ほど単純ではないが、水圧の消散に対して飽和層厚がある程度よりも小さくなると過剰間隙水圧が上昇した状態を保持することができず、堤防の変状がほとんど進行しなくなることが考えられる。

## 5. 堤体の液状化対策に関する模型実験<sup>6)</sup>

堤体の液状化対策としては、液状化しない堤体とするために、新たに築堤する場合には液状化しにくい材料を選定すること、よく締め固めることや、既設の堤防には堤体内の水位をドレーン工によって低下させることが基本的な対策と考えられる。

しかし、既設の堤防においては、堤防と堤内地側の排水路の高さの関係から十分な水位低下が図れない場合もあり、このような場合でも既設堤防に対して効果を発揮する対策技術が必要となる。そのような工法の1つとし

て、堤体が液状化してもより尻で変状を押え込むようより尻部にドレーン工<sup>7)</sup>や押え盛土を設置する対策工法が考えられ、その効果を検証するため動的遠心模型実験を行った。この工法でも地下水位低下と同様にドレーン工を用いるが、副次的に地下水位低下は期待するものの、地下水位低下が主たる目的ではないことが、地下水位低下のドレーン工と異なる点である。

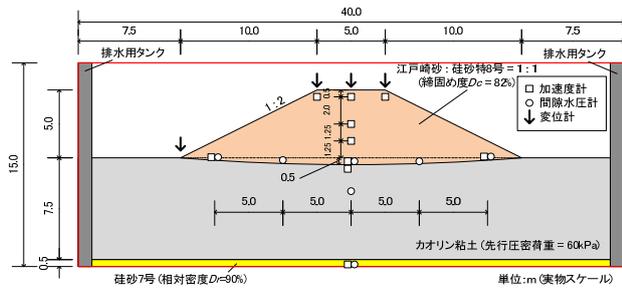
実際、東北地方太平洋沖地震では、浸透対策で設置した裏のり尻のドレーン工が変状を抑制したと考えられる事例もある。

### (1) 実験方法

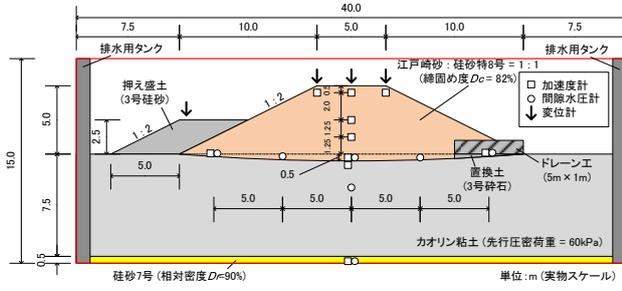
実験は、50Gの遠心力場の下に行われた。以降に示す数値は全て実物スケールに換算したものである。模型概要を図-18に示す。基礎地盤はカオリン粘土により、堤体は江戸崎砂と東北硅砂特8号を1:1の比率で混合した材料により、締固め度 $D_c=82\%$ で作製した。無対策のCase8は、粘性土層厚が7.5m、堤防高さが5.0m、のり勾配が1:2である。軟弱粘性土地盤上の盛土は、圧密過程で沈下する際に下部が側方変形によってゆるみ、これが液状化に伴う盛土の変形量に影響を与えることが指摘されている<sup>5)</sup>が、本実験においては粘性土上面を下に凸の形状(堤防中央で0.5m)に掘り込み、そこに堤防模型を作製した。

Case7, 9は対策工を設けたケースであり、表のりに押え盛土、裏のり尻にドレーン工を設けた状況を模擬している。押え盛土については、押え盛土自体に液状化を生じさせず、かつ降雨後に上昇した堤体内水位の表のりからの排水を妨げないように、粗砂(3号硅砂)により模擬した。また、ドレーン工の下部には基礎地盤にめり込んだ一部の堤体材料が存在するが、これがさらに液状化することを避けるため、粘性土上面までの範囲を3号硅砂により置き換えた。Case9は、Case7に対して押え盛土、ドレーン工の寸法を縮小したケースである。

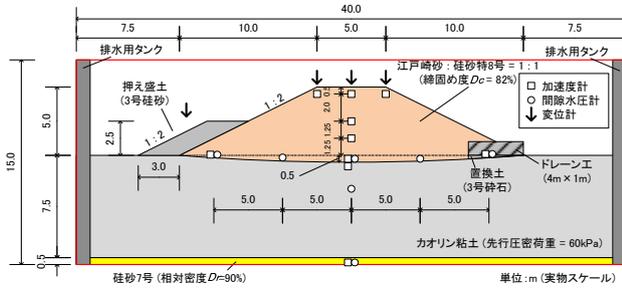
堤防模型を作製した後、遠心加速度にあわせて水の



① Case8



② Case7



③ Case9

図-18 模型概要

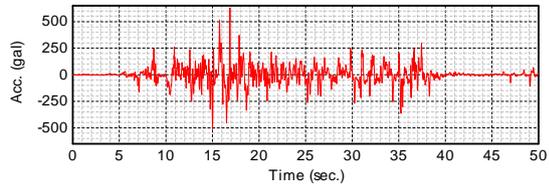
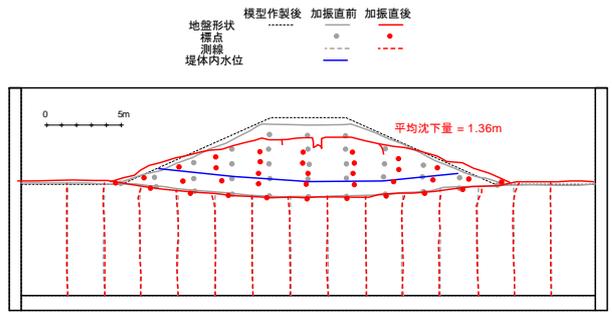


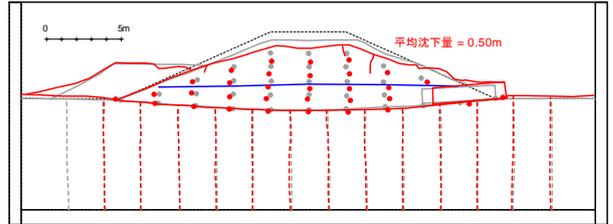
図-19 入力地震動波形

50 倍の粘性を有するメトロゾ水溶液を用いて、脱気槽内で周辺地盤 G.L. +1.8m 程度まで水位を上昇させることで堤体下部を飽和させた。その後、遠心加速度を 50G まで上昇させ、再圧密が完了した後に排水用タンクを介して盛土両側の水を土槽外に排水し、堤体内水位が所定の高さになった時点で加振を行った。無対策である Case8 の堤体内水位は、実際に見られたような被災状況を再現できるように試行錯誤により、堤体下部の飽和層厚が 1.3m となるように設定した。Case7,9 においてはドレーン工によって堤体内水位の低下も副次的に期待できるため、浸透流解析から求めた低下した水位を、加振時の地下水位に設定した。

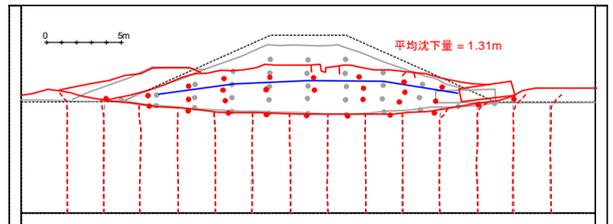
入力地震動は、道路橋示方書に示される地表面での動的解析用波形のうちL2タイプI地震動・II種地盤の波形



① Case8



② Case7



③ Case9

図-20 河川前後の変形状況

(板島橋) とし、土槽底面からの入力にあたり、下方への逸散減衰の影響等を勘案して振幅を0.7倍に調整した。時刻歴波形を図-19に示す。

(2) 実験結果

加振前後の盛土の変形状況をスケッチしたものを図-20 に示す。同図に示した堤体内水位は、加振直前における間隙水圧計測値から求めたものである。また、測線とはガラス面沿いに設置した乾麺の変形状況をトレースしたものである。

無対策の Case8 では天端の3点で計測された沈下量の平均値が 1.36m であり、盛土内の標点の移動状況から、堤体下部の飽和域にせん断ひずみが集中している様子が分かる。天端には著しい縦断亀裂、陥没が生じていた。これに対し、Case7では天端の平均沈下量が0.50mに抑制された。特に、表のりの押え盛土に変形はほとんど見受けられず、良好に対策効果を発揮している。ただし、裏のり尻のドレーン工に生じた0.7m程度の水平変位に伴い、裏のりの変形がやや大きい。天端、のり面には亀裂が生じたものの、Case8に比べると軽微であった。

対策工の寸法を小さくしたCase9では、天端の平均沈下量が1.31mと大きく、無対策のCase7とほぼ同程度の大

きさであった。表のりの押え盛土には、その下部の粘性土にすべりを生じながら水平変位を生じ、裏のり尻のドレーン工についても、滑動あるいはごく浅層での支持力破壊のような形態による著しい残留変位が生じた。いずれの対策工も、液状化を生じた堤体下部から受けた水平力を基礎地盤に伝達する際に、寸法が小さいため対策工からの荷重が狭い範囲に集中し、これが滑動あるいは支持力破壊のような形態の大変形につながったものと考えられる。

一方で、東北地方太平洋沖地震により強い地震動を受けた地域において、のり尻付近のドレーン工が設置されていた堤防も存在したが、本実験のようにドレーン工に大きな残留水平変位が生じた事例は確認されていない。このため、本実験で基礎地盤に用いたカオリン粘土による粘性土層のせん断強度が実地盤に比べて過小であった可能性が考えられる。

## 6. 指針等の改定

「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」（河川堤防耐震対策緊急検討委員会）<sup>1)</sup>に整理された知見や4. や5. の結果を踏まえ、平成24年2月に河川構造物の耐震性能照査指針<sup>8)</sup>を改定し、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<sup>9)</sup>を策定した。これらの指針、マニュアルのポイントを以下に述べる。

### (1) 河川構造物の耐震性能照査指針

平成19年3月に策定された「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」（河川局治水課）を改定したものである。

主な改定のポイントは、①堤体の液状化、②施設設計上の津波、③地殻変動に伴う広域な地盤沈降の3項目である。

堤体の液状化については、本来基礎地盤の液状化と同じ液状化であるため、同様に扱うことが望ましいが、堤体の液状化に関する液状化判定や解析手法の概要性の検証に関する未解明の技術的課題がある状況から、基礎地盤の液状化と堤体の液状化を分けて照査することとした。

施設設計上の津波は、中央防災会議において2つのレベルの津波を想定することが示され、河川津波検討会においては河川管理における施設の諸元等を定める津波を海岸保全施設等の整備を行う上で想定する津波とされたことを受けたものである。

地殻変動に伴う広域な地盤沈降は、東北地方から関東地方の太平洋沿岸を中心に地殻変動に伴う地盤沈降が観測された。地盤沈降によって、浸水被害が拡大・長期化した地域もあった。今後、発生することが想定されるプレート境界型地震でも大規模な地殻変動に伴う地盤沈降が予測される地域もあることから、指針に明記したもの

である。

### (2) 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

点検の具体的な手順などをより詳細に示したマニュアルとなっており、指針同様、上述の知見を踏まえ策定したものである。

点検のフローは1次～3次点検から構成される。2次点検以降は、指針の改定ポイントに挙げたように、基礎地盤の液状化と堤体の液状化に分けて点検を実施することになっている。今回の改定で新しく追加された堤体の液状化については、築堤履歴も考慮した上で、図-16から得られた堤体の土質と基礎地盤への堤体のめり込みチン化量によって2次点検を実施した後、3次点検として図-16から得られた堤体下部の飽和層厚や飽和層厚比による判定を行うこととした。

## 7. 解決すべき技術的な課題

平成24年2月に河川構造物の耐震性能照査指針を改定し、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の策定等を行った過程で、様々な技術的な課題が存在することが明らかとなった。その一部を以下に示す。河川堤防の耐震性をより合理的に向上できるよう、今後これらの問題を解決するために、継続的な検討を行っていききたい。

### (1) 液状化判定法

現行の液状化判定法は、安全側の判定結果を与えることが明らかとなっている<sup>10)</sup>。これは、合理化の余地があることを示すものでもある。地震動の継続時間や年代効果（自然地盤と埋立地盤あるいは堤体下部の液状化の違いなど）、土に含まれる細粒分などの着目点が考えられる。また、深い砂層の取り扱いも課題である。

### (2) 変形量解析法

河川構造物の耐震性能照査指針では、基礎地盤の液状化による堤体の沈下量をみなし規定として静的照査法によって求めることとなっているが、堤体の液状化に対しては適用性が十分に確認されていないことから飽和層厚などから対策の必要性を検討することとしている。本来、基礎地盤の液状化に対しても、堤体の液状化に対しても同じ手法が使えることが望ましい。

また、静的照査法として広く使われている手法では、条件によって実績沈下率の最大値 75%を超える大きな沈下量となる場合がある。これが原因で対策工の設計が適切に行えない場合がある。また、対策工を設置した場合を解析するには、対策工とその周辺の土のモデル化によって解析結果が大きく異なるため、標準的なモデル化の方法について課題が残されている。

### (3) 堤体に液状化に関する調査と対策方法

堤体の液状化による変状の有無は、堤体下部の飽和層厚によって敏感である可能性が高い。したがって、堤体内の地下水位は季節変動や降雨などにより上下し、堤防縦断方向にも変化することも踏まえ、正確かつ簡易に調査可能な手法が必要となる。

### 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，2011.9.
- 2) 関東地方河川堤防復旧技術等研究会：河川堤防における地震対策の検討とりまとめ，2011.9.
- 3) 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，2011.12.
- 4) 谷本俊輔，石原雅規，佐々木哲也：東北地方太平洋沖地震における堤体液状化の要因分析，2012.6.
- 5) 玉邑修二，岡村未対：内部応力分布の変化が地震時の盛土の

安定性に与える影響，第45回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1463-1464，2010.8.

- 6) 谷本俊輔，林宏親，石原雅規，増山博之，佐々木哲也：堤体盛土の液状化対策に関する動的遠心力模型実験，第47回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1349-1350，2012.7.
- 7) 林宏親，西本聡，橋本聖，梶取真一：泥炭地盤に築造された盛土の地震による変形メカニズムと耐震補強，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No. 3, pp.465-473，2011.
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局：河川構造物の耐震性能照査指針・解説，2012.2.
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局：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，2012.2.
- 10) 国土交通省液状化対策技術検討委員会：「液状化対策技術検討委員会」報告書，2011.8.