

東北地方太平洋沖地震における 堤体液状化の要因分析

STUDY ON DAMAGE TO RIVER EMBANKMENT CAUSED BY LIQUEFACTION
IN BODY OF RIVER LEVEE DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF
TOHOKU EARTHQUAKE

谷本俊輔¹・石原雅規²・佐々木哲也²

Shunsuke TANIMOTO, Masanori ISHIHARA and Tetsuya SASAKI

¹正会員 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
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 工修 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 (同上)

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, many damage of river levees caused by liquefaction in body of levee was reported. To clarify the mechanism of liquefaction in body of levee and to establish the assessing method of seismic performance of river levee are required in order to promote the suitable countermeasure against earthquake. In this study, the formation process of the saturated zone in the bottom part of levee was typified and the relationship between liquefaction-induced settlement at crest and specification of levee was investigated based on damage data obtained from this earthquake. The results obtained in this study gives the important information which contributes to precise and efficient seismic countermeasure.

Key Words : River embankment, Earthquake, Liquefaction, Fill

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震により、淀川河口付近等の河川堤防に甚大な液状化被害が生じたことを契機として、河川堤防の耐震点検および対策が進められてきた。その中では、これまでの被災事例に基づき、主として堤体の下に位置する基礎地盤が液状化することによる被害の軽減に主眼が置かれてきた。一方、一部では堤体自体に液状化が生じたことによる被災事例¹⁾²⁾が存在することも知られていたが、平成19年3月に通知された河川構造物の耐震性能照査指針(案)³⁾においては、堤体の液状化による堤防被害に対する注意喚起がなされるにとどまっていた。

東北地方太平洋沖地震においても東北地方、関東地方の広範囲において堤防の液状化被害が生じたが、地震後に精力的に行われた各種調査の結果によれば、堤体下部の液状化による大規模な被災事例が数多く存在するとされている⁴⁾。今回の地震による被災事例を踏まえると、今後、河川堤防の適切な耐震対策を進めていくためには、堤体液状化の発生メカニズムを明らかにし、堤体の液状化による被害も含めた地震時の危険箇所を抽出する手法

を確立することが必要である。

そこで、本報では、堤体の液状化による被害に対する安全性評価に資することを目的として、堤体の液状化による被災事例の分析を行った結果について報告する。

2. 堤体の液状化による被災事例

まず、堤体液状化による被害の発生メカニズムを説明する。堤体に液状化を生じるような堤防は、堤体内に砂質土が存在するとともに、堤体下部に飽和域が地震前より形成されているという特殊な状況下に置かれている。被災事例の分析から、このような堤防の状況を形成するに至る素因を見出すことができれば、堤体の液状化による被害に対する危険箇所の的確な抽出方法の確立に資する重要な情報を与える。本報では、まず、東北地方太平洋沖地震による代表的な堤体液状化事例を挙げ、そのような堤防の状況の形成素因について考察を行った。

(1) 阿武隈川・枝野地先



写真-1 阿武隈川・枝野の被災状況

阿武隈川右岸30.6k+34～31.4k+160 (宮城県角田市枝野)では、延長800m程度にわたって堤防天端に著しい陥没、亀裂を伴う沈下が生じるとともに、裏のりの崩壊あるいははらみ出しが生じた。被災状況を写真-1、断面図を図-1に示す。崩壊した裏のりの亀裂内部や裏のり尻付近には噴砂の痕跡が多く見られ、裏のり尻の水平変位量は最大で10m近くにも達していた。一方で、表のりについては、のり肩付近に亀裂が生じた箇所が一部で見られたものの、のり尻付近には変状が生じていなかった。断面図からは、堤体下部が地下水位以下に位置することが分かる。Ac1層の上面形状が下に凸であるため、堤体下部に水がたまりやすい状態にあったことが推察される。

東北地方整備局は、本地点の堤防の被災メカニズムを明らかにするため、地震後に地盤調査、開削調査等を行い、以下のことを明らかにしている⁹⁾。

- ・ この一帯の堤防は、旧堤 (Bc) が粘性土から構成されており、高水敷の掘削土である砂質土を用いて嵩上げおよび川裏側への腹付けによる拡幅がなされている。
- ・ 基礎地盤のAc1層から採取された試料の圧密試験結果によれば、Ac1層の上面形状は地震前の堤体自重による圧密沈下によるものとして概ね説明される。
- ・ 新堤の砂質土 (Bs) は上部が茶褐色、下部が暗灰色であった。このことは、新堤の下部が恒常的に飽和した状態にあったことを示している。実際、開削調査にあたっては、堤内地盤高程度より下方を掘削した際、著しい地下水の湧出が確認されている。
- ・ ジオスライサーによる地層の抜き取り・観察の結果

によれば、暗灰色の砂質土の上面形状が横断方向に大きく褶曲していた。このことは、堤体下部の飽和域が液状化により大変形を生じたことを示している。

- ・ 約800mの被災区間では地下水位が堤体内に存在し、その上下流側の無被災区間では堤体内に水位が確認されなかった。

以上より、本地点の堤防の被災原因は、堤体下部の飽和砂質土の液状化であると判断される。地震前のAc1層の圧密によって堤体下部が基礎地盤に下に凸の形状でめり込むように沈下しており、堤体内に浸入した雨水等が堤体下部に滞留しやすい構造となっていたことが、地震被害を生じさせた素因となっているものと考えられる。また、堤体内に浸入した雨水等は、堤防の縦断方向に見ても、被災区間内の堤体下部に集まりやすい構造になっていたことも推察される。

このような堤体下部の飽和域の形成パターンは1993年釧路沖地震における釧路川堤防¹⁾と同様であり、今回の地震では阿武隈川のほか、鳴瀬川、江合川など東北地方に多く見られるとともに、関東地方においても利根川右岸69～71k付近等に見られた。

(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。被災状況を写真-3、断面図を図-2に示す。

本地点では地震後に、被災区間前後の無被災区間も含めた5断面においてボーリング調査が行われた。その断面図の一つを図-2に示す。川裏側の堤体下部には、暗灰色の中砂～細砂により構成される薄い砂質土層Bs1が存在するが、この下面が概ね下に凸の形状を有するとともに、裏のり尻の亀裂内部に溜まった噴砂の起源となっている。上述のとおり、堤防の変状は川裏側に生じていたが、Bs1層の存在が認められるのは被災区間の主として川裏側であり、被災区間の川表側や上下流側の無被災断面にはその存在が確認されていないことから、Bs1層が被害に関与したものと考えられる。

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

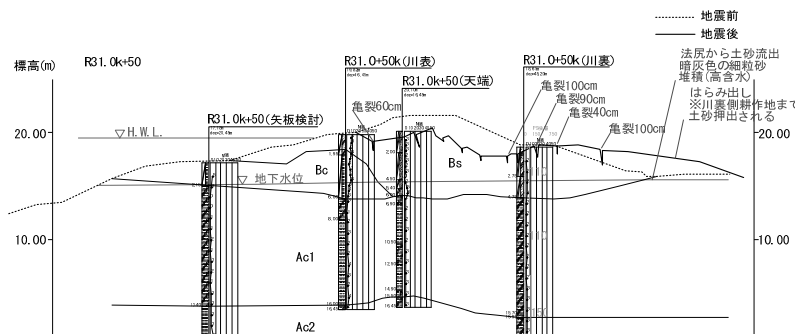


図-1 阿武隈川右岸31.0k+50の断面図 (東北地方整備局提供資料に加筆修正)



写真-3 江戸川・西関宿の被災状況 (関東地方整備局提供)

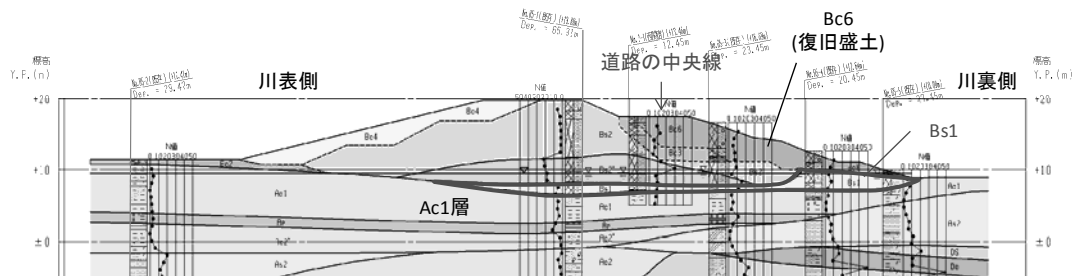


図-2 江戸川右岸57.7k+15の断面図 (関東地方整備局提供資料に加筆修正)

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) 湊沼川・下石崎地先

湊沼川左岸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まで達していた箇所もあった。被災状況を写真-2、断面図を図-3に示す。なお、河川管理者によれば、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のため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ていた可能性が高い。

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Bscnc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



写真-2 湊沼川・下石崎の被災状況 (関東地方整備局提供)

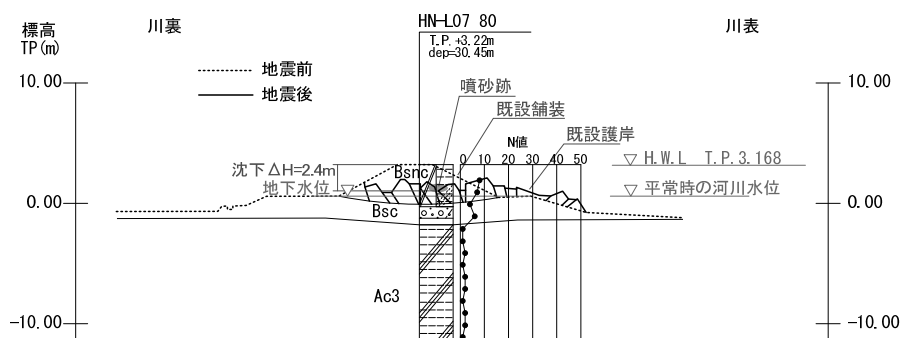
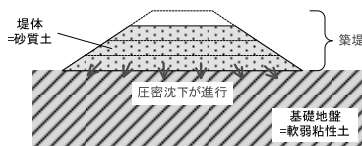
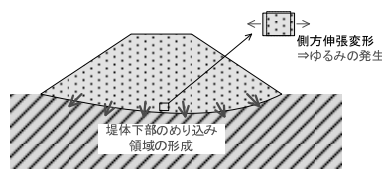


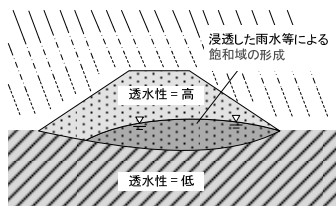
図-3 湊沼川左岸8.0kの断面図 (関東地方整備局提供資料に加筆修正)



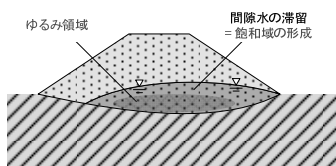
(a) 軟弱粘性土地盤上に築堤



(b) 下に凸状の圧密沈下、堤体下部のゆるみの発生



(c) 降雨等による湿潤化



(d) 堤体下部の飽和域の形成

図-4 軟弱粘性土地盤の圧密沈下による飽和域の形成

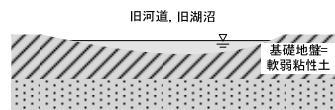
から堤体下部に水が浸入しやすい状況が、堤体下部の飽和域の形成に影響を及ぼした最も大きな要因であると考えられる。堤防の変状が全延長にわたって川表側に向かって生じていたという事実からは、表のり尻付近の堤体内水位が高かったことが推察される。

(4) 堤体下部の飽和域の形成パターン

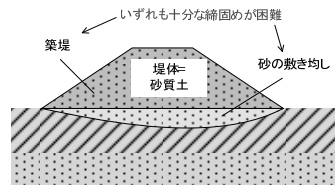
以上より、東北地方太平洋沖地震に見られた事例を通じて、堤体の液状化による被害を生じさせた要因である堤体下部の飽和域形成パターンを類型化すると、次の3通りが考えられる。

①軟弱粘性土地盤の圧密沈下 (図-4)

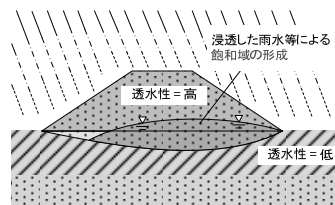
軟弱粘性土地盤上に築堤すると圧密沈下が生じるが、断面方向の上載荷重の違いにより、堤体下部は下に凸の形状を呈する(a)。このとき、粘性土の上面付近では盛土による鉛直力とともにせん断応力を受けることで、粘性土と堤体下部が側方に伸張変形し、ゆるみ(密度、拘束圧の低下)を生じる場合がある(b)。堤体材料が砂質土である場合、降雨等による湿潤化(c)の後、堤体内に浸透した間隙水が下部に達しても粘性土である基礎地盤には浸透しにくいので、下部に飽和域を形成しやすい堤防構造となる(d)。なお、圧密沈下に伴って生じる堤体下部のゆるみが、液状化に伴う地震時の堤防の変形量に大きな影響を与えるとの研究報告例⁶⁾もある。



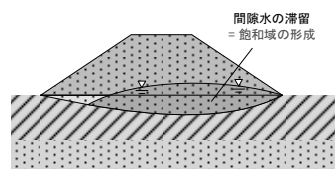
(a) 下に凸の水底面



(b) 埋立て・築堤



(c) 降雨等による湿潤化



(d) 堤体下部の飽和域の形成

図-6 旧湖沼・旧河道の埋立てによる飽和域の形成

②旧湖沼・旧河道の埋立て (図-6)

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(a)。これを埋め立てて築堤(b)することで、堤体下面が下に凸の形状となる。また、埋立て時の施工を効率よく行うために砂質土が好んで選定され、かつ、元の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。このような堤防が降雨等により湿潤化(c)した後、浸透水が排水されにくく(d)、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。

③平常時より河川水位が高いケース (図-5)

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が多いと考えられる。上述した澗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

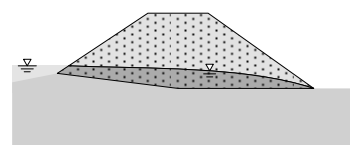


図-5 平常時の河川水位による飽和域の形成

化を生じる可能性が考えられる。

3. 堤体の液状化事例に関する定量的分析

(1) 分析対象および分析方法

次に、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。これらはいずれも地震前後の堤防形状が明らかであり、かつ、地震後に行われたボーリング・サウンディングにより堤体および基礎地盤の土質構造が明らかになっている地点である。

まず、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。その上で、②に該当するケースのみについて、のり勾配、堤体土質、堤体内水位と被災程度の関係进行分析した。

②のみを分析対象としたのは、これまでに主眼が置かれてこなかった堤体の液状化が被災程度に及ぼす影響度合いを把握することを目的としたためである。③に該当するケースは、被災の程度に対する基礎地盤の液状化、堤体の液状化の寄与の程度が不明であり、これを分析対象に加えることで傾向が不明となる場合が存在したためである。

被災程度の定量化にあたっては、地震後における堤防機能の低下度合いを表す指標として沈下量 S に着目しつつ、堤防の大きさも考慮し、沈下率 S/H を選定した。ここに、 H は堤防高さである。沈下量 S は地震前後における天端高の比高として定義し、地震後の天端高は、地震後の断面においても地震前の天端幅 B を確保している高さとして定義した。堤防高さ H は両のり面におけるのり肩へのり尻の比高を平均することで算出した。

(2) のり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-7に示す。ここで、堤体・基礎地盤の両者の液状化が原因と考えられる事例はプロットしていない。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-7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傾向を示していると考えられる。

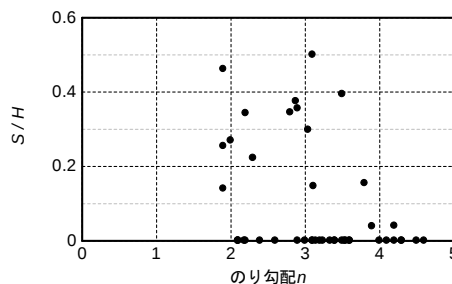


図-7 のり勾配 n と沈下率 S/H の関係

(3) 堤体下部の飽和域の土質

今回の地震による堤体液状化事例では、変状を生じた堤体下部の飽和土にれき質土が含まれているケースが少なく、ほとんどは砂質土あるいは細粒土であった。そこで、堤体下部の飽和域で採取された標準貫入試験試料の物理試験により得られた細粒分含有率 FC ・塑性指数 IP を沈下率 S/H ごとにプロットしたものを図-8に示す。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。様々な築堤履歴を有する堤防は、一般にその土質構造が複雑であることから、被災地点における堤体下部の飽和域にも様々な土質が存在するが、ここでは、特に変状に関与したと考えられる部分における FC 、 IP の値を示している。堤体下部のどの部分が変状に関与したかは、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てプロットしている。

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く、液状化が被災原因となっているという推察を支持する結果である。 FC が35%以下の範囲で大きな IP を有する土が存在するが、これは、液性・塑性限界試験が0.425mm以上の粒径を有する材料を除外して行うものであるため、 FC が小さい

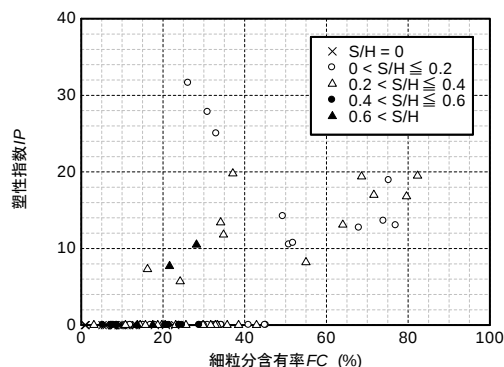


図-8 堤体下部の飽和域の細粒分含有率 FC ・塑性指数 IP と沈下率 S/H の関係

土の IP は、必ずしもその土の粘性を表すわけではない点に注意を要する。

変状に関与した可能性が考えられる箇所の土質は $FC \leq 35\%$ あるいは $IP \leq 20$ の領域に分布しており、現在の液状化判定⁷⁾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。

(4) 盛土下部の飽和層厚と沈下量の関係

盛土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-9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、盛土を構成する砂質土の下方に難透水層が存在する場合、盛土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で宙水を逸失しないよう、調査は慎重に行われている。盛土下部の飽和層厚 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。

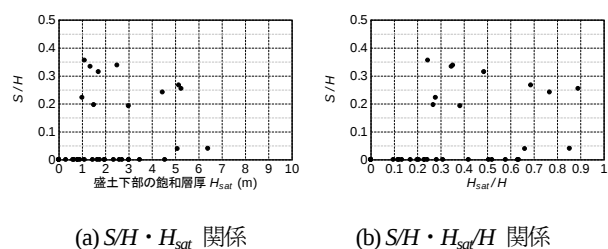


図-9 堤体下部の飽和層厚 H_{sat} と被災程度の関係

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に単純ではないかもしれないが、水圧の消散に対して飽和層厚が大きな影響を与えることを考慮すると、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、 $H_{sat} = 1\text{m}$ あるいは $H_{sat}/H = 0.24$ はその境界を表している可能性が考えられる。

4. まとめ

本報では、堤体の液状化に対する堤防の危険箇所抽出手法の構築を目的として、東北地方太平洋沖地震における堤体の液状化事例の分析を行った。得られた知見は次のとおりであり、いずれも今後の耐震点検の的確かつ効率的な実施に資する重要な基礎データであると考えられる。

- (1) 堤体下部に形成された飽和域が存在することが堤体の液状化を生じさせる素因であるが、その形成過程としては、①軟弱粘性土地盤の圧密沈下によるもの、②旧湖沼・旧河道の埋立てによるもの、③平常時の河川水位が高いことによるもの、の3つのパターンが見られた。
- (2) 被災程度を沈下率 S/H (S : 沈下量, H : 堤防高さ) で定量化し、これと堤防諸元との関係を分析した結果、①のり勾配が4割を超えると天端の沈下率 S/H (S : 沈下量, H : 堤防高さ) が急激に小さくなること、変状を生じた堤体下部の土質はれき分をほとんど含まない砂質土～細粒土が大半であり、その物理特性の範囲は細粒分含有率 $FC \leq 35\%$ または塑性指数 $IP \leq 20$ の範囲にあること、③堤体下部の飽和層厚 $H_{sat} < 1\text{m}$ かつ $H_{sat}/H < 0.24$ の場合は堤体液状化による顕著な被害が生じていないことが明らかとなった。

謝辞：本報で分析対象とした被災事例に関するデータの多くは、国土交通省水管理国土保全局治水課、東北地方整備局、関東地方整備局に提供いただいたものである。ここに深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 北海道開発局帯広開発建設部：平成5年(1993)釧路沖地震十勝川築堤災害復旧工事誌「大地が震え堤防がなくなった日」、1994.12.
- 2) (財)北海道河川防災研究センター：平成15年十勝沖地震河川災害調査検討会報告書、2004.3.
- 3) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説 II. 堤防編、2007.3.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説 I. 共通編、2007.3.

(2012. 4. 5受付)