

研究報告

東日本大震災における河川堤防の被災形態の特徴



宮武 晃司

元河川政策グループ
研究主幹



中山 修

河川政策グループ
副総括



柳畑 亨

河川政策グループ
主任研究員

1. はじめに

東日本大震災では、大規模な堤防被災が同時多所で発生した。このような被災の場合、適切な被災要因の評価や堤防機能の復旧のためには、初期段階の被災状況調査が大切である。特に、大変形が生じていた箇所が多くでは、堤体(閉封飽和域)が液状化していたが、その復旧対策には閉封飽和域の状態を迅速に捉えることが極めて重要であった。

本稿では、10河川33箇所で行った現地調査を行い、閉封飽和域が液状化した場合の被災の特徴や、被災の原因を判別するための着目点を取りまとめた。

2. 現地調査

平成24年2月から12月にかけて、東北及び関東地方の国土交通省が管理する河川の堤防被災箇所のうち、閉封飽和域の液状化が被災要因であったと思われる箇所を中心に、堤防開削など復旧段階での現地調査を33箇所で行った(表1)。各被災箇所での被災要因(閉封飽和域の液状化、基礎地盤の液状化)の区別は、噴砂の発生状況、被災箇所で行ったボーリング調査の結果や開削断面・トレンチ掘削断面の観察等に基づいて総合的に判断した。

なお、大規模な被災を受けた堤防被災箇所のうち閉封飽和域の液状化による被災箇所と判断される箇所は、東北地方で21箇所中16箇所、関東地方で55箇所中11箇所となっている。

閉封飽和域は、軟弱粘性土層からなる基礎地盤上面への築堤により、盛土荷重による圧密沈下で基礎地盤の上面が凹状となり、堤体が側方伸張変形することで堤体下部の密度低下や拘束圧低下(ゆるみ)が生じ、また圧密沈下に伴い堤体下部が地下水位以下に水没することによって形成された地下水位以下の領域である。この領域が液状化することで、図1に示すようなメカニズムで堤防が被災する。なお、堤防の被害に関与する閉封飽和域には、地下水位が浅

の毛管上昇域が含まれる可能性も考えられる。

また、閉封飽和域の液状化に類似した被害は、粘性土から構成される旧河道の河床を砂質土により埋め立てた場合や、平常時から河川水位が高く堤体下部が常に飽和している場合においても生じる可能性も考えられる。

表1 地調査箇所(33箇所)

河川名	地区名 ※青字は閉封飽和域の液状化による被災と判断される箇所
鳴瀬川	下中ノ目地区、福ヶ袋地区、木間塚地区
北上川	吹張地区、二渡地区、生母黒石地区、一閑遊水地
旧北上川	和洲地区
江合川	瀧尻地区、福沼地区、平針地区、小泉地区、関根地区、中島乙地区、上谷地区
吉田川	不来内排水樋門、羽生地区、大道地区
久慈川	本米崎地区、落合地区
那珂川	下石崎地区、三反田地区、中河内地区
霞ヶ浦	本新地区、息栖樋門
利根川	神崎樋管、佐原地区、横利根開門、飯島樋門、三和地区、布川地区、中谷地区
江戸川	西関宿地区



写真1 鳴瀬川下中ノ目地区



写真2 那珂川支川
溜沼川下石崎地区

3. 現地調査結果

(1) 堤防開削底面に残された縦断亀裂の痕跡

写真3は図1に示した点線に相当する堤防底面の開削状況の例である。

開削途中には、堤体横断面内に残された亀裂など堤体変形の痕跡、亀裂内に貫入した噴砂脈などを確認したほか、開削底面では、縦断方向に青灰色(還元色)の土が縞模様を呈している状況を確認した。砂脈に比べてやや幅の広いこの縞模様は、堤体に生じた亀裂に沿って下位の液状化層(還元された砂層)からの噴砂が侵入した痕跡を示すものであり、噴砂の中の細粒分が亀裂内に残留したものと考えられる。このことは、閉封飽和域の液状化が堤体の側方伸

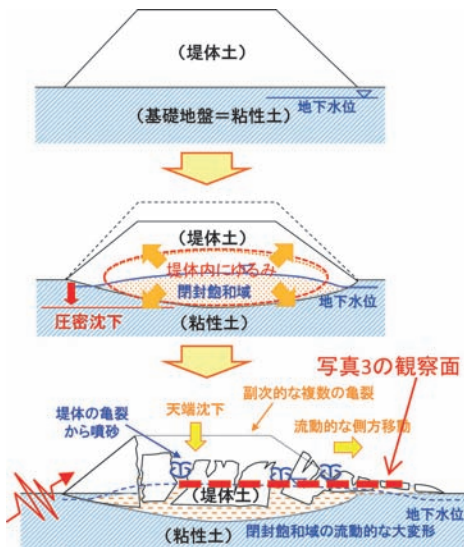


図1 閉封飽和域の液状化による被災メカ



写真3 鳴瀬川下中ノ目地区 (H24.6.12撮影)

張変形を引き起こし堤体下部に拘束圧低下による多数の縦断亀裂を発生させる破壊メカニズムが、被災現場で確認できたことを示しているものと思料される。

(2) 堤体下部中央の緩みの状況

開削横断面で実施した土壌硬度試験結果の例を図2の下図に示す(江合川平針地区、閉封飽和域の液状化箇所)。この断面では、堤体上部の硬度よりも堤体下部中央の硬度が低くなっていた。図2の上図に示した隣接する無被災箇所の断面では、堤体下部中央の硬度が堤体上部の硬度より高かったことを考慮すると、被災した堤防は堤体中央に緩みを持つことが明らかになった。

(3) 被災状況の整理

閉封飽和域の液状化により被災した堤防と基礎地盤の液状化により被災した堤防で、変形にどのような違いが生じるのかを確認するため、図3に示す変動量について、東北地整管内21箇所、関東地整管内24箇所のデータを分析した。

図4は、天端沈下量と横断方向広がり量をグラフにしたもので、閉封飽和域の液状化により被災した箇所では、天端沈下量及び横断方向広がり量が大きくなる傾向が確認できた。特に閉封飽和域の液状化により被災した堤防では、

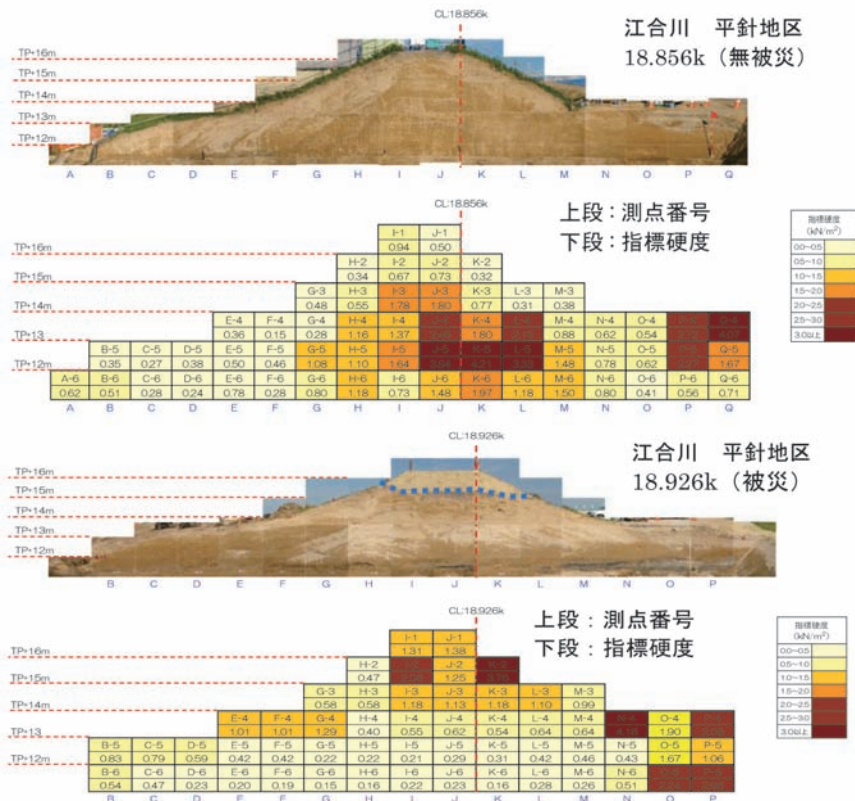


図2 江合川平針地区 堤防横断面土壌硬度調査結果

横断方向の広がり量が大きく、これは堤体下部の側方伸張変形に伴って縦断クラックの開口幅が広がっていた被災状況とも符合する。

また図5は、堤防横断面における沈下・陥没等による減少量と、はらみ出し等による増加量とを比較したもので、閉封飽和域の液状化により被災した箇所では、沈下・陥没等による減少量とはらみ出し等による増加量が概ね一致するか、はらみ出し等による増加量が卓越することが分かっ

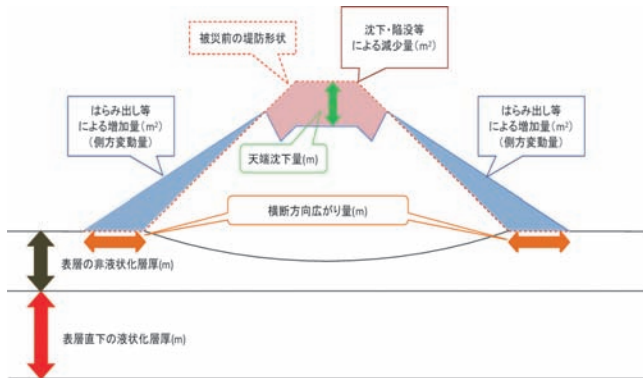


図3 堤防断面における地震時変動量の模式図

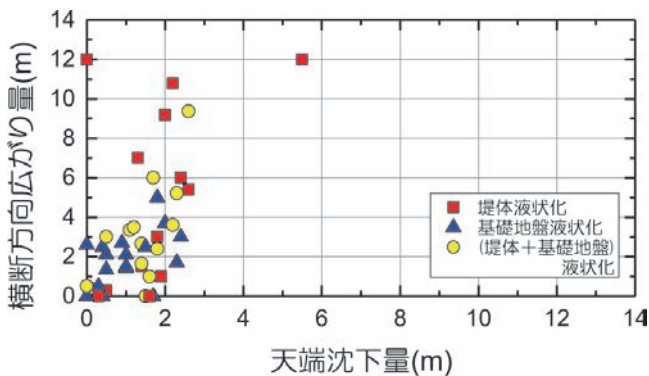


図4 横断方向広がり量と天端沈下量の関係

た。前者は閉封飽和域の液状化により被災した堤防は、基礎地盤は変形せずに変形の全てが堤体内で起こる（変形する領域が限定されている）ことを示し、後者は、ストレッチ破壊により縦断クラックの開口部が広がるため、はらみ出し等による増加量が卓越することを示しているものと考えられる。

(4) 地盤内の土層構成

さらに、どのような条件下で、閉封飽和域の液状化による被災や基礎地盤の液状化による被災が起きているのかを確認するため、地盤内の土層構成について分析した。

その結果、今回分析対象とした範囲において、閉封飽和域の液状化により被災した箇所では、図6から閉封飽和域の厚さが1m以上あることが確認され、過去の閉封飽和域の厚さが1m以上の場合に堤防が被災しているとする論文等^{1), 3), 4)}の内容を裏付けるものとなった。また図7より、「基礎地盤の液状化」のみによる被災箇所は、地盤表層3m以内に砂層が存在していることが確認された。

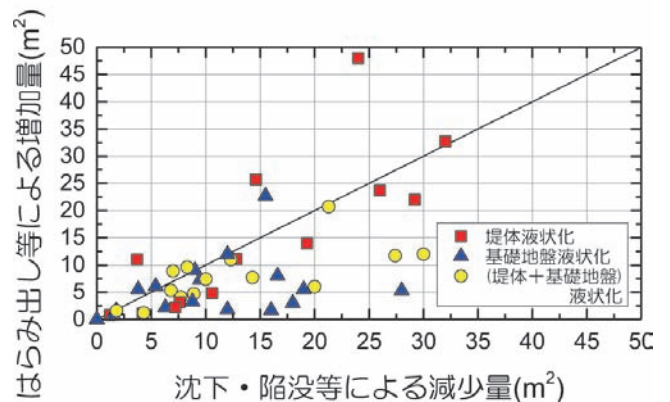


図5 はらみ出し等による増加量と沈下・陥没等による減少量の関係

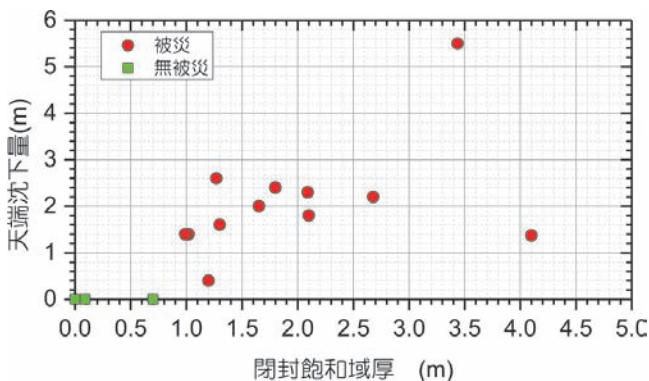


図6 天端沈下量と閉封飽和域厚の関係

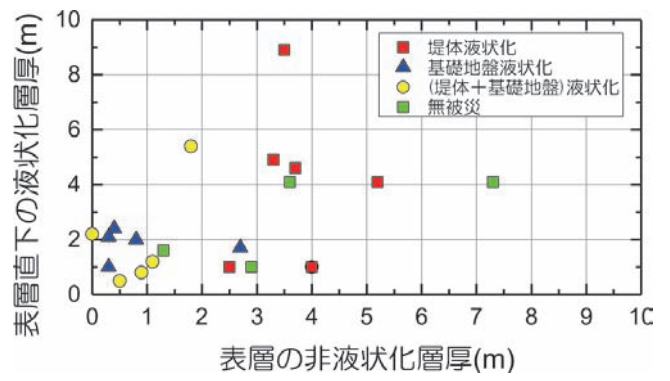


図7 表層直下の液状化層厚と表層の非液状化層厚の関係

4. 被災状況の特徴の共通点

調査した 33 箇所のうち、閉封飽和域の液状化が被災要因であったと思われる 16 箇所について、図 8 に示すように、共通する①～⑤の特徴が見られた。その関連性を、閉封飽和域の液状化により被災した堤防の現地調査箇所において整理し、表 2 にまとめた。基礎地盤の液状化による被災箇所では、堤防周辺部に噴砂跡が見られたり、堤脚水路が側方に移動・変形するなど地盤の側方流動の影響が確認でき

るのに対し、閉封飽和域の液状化の場合には表 2 のとおり、堤防下部の側方伸張変形に伴う堤防部を主とした被災の特性が共通的に認められることがわかった。これによって地震直後の堤防被災状況確認時に、この 5 項目を着目点とし、そのいくつかに該当するかどうかで、被災原因が閉封飽和域の液状化であるかを推定することが可能と考える。なお、堤防周辺とは堤防から見渡せる範囲を、「はらみだし」や「側方流動」は無被災区間との堤防法尻の見通しから目視で変形が確認できる程度を目安とする。

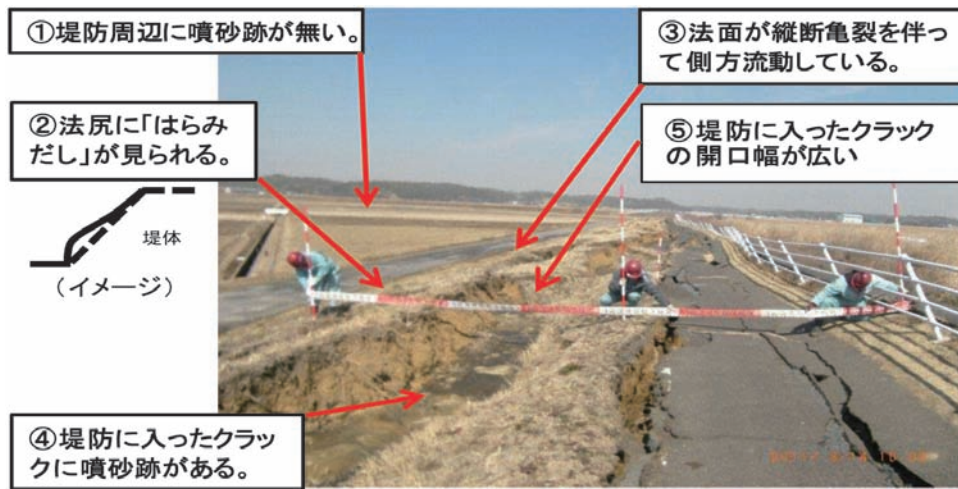


図 8 閉封飽和域の液状化による被災の着目点

表 2 現地調査箇所（閉封飽和域の液状化）の着目点の整合性

調査地区名 (現地調査箇所内、 閉封飽和域の液状化 が被災原因となっ ている箇所)	液状化の場所	①堤防周 辺で噴砂 痕がない。	②法尻に「は らみだし」 が見られ る。	③法面が縦 断亀裂を 伴って数 メートル 以上側方 流動して いる。	④堤防に入 ったクラ ックに噴 砂痕があ る。	⑤堤防に入 ったクラ ックの開 口幅が広 い
鳴瀬川下中ノ目地区	堤体	○	○	○	○	○
鳴瀬川木間塚地区	堤体・基礎地盤	○	○	○	×	○
江合川湊尻地区	堤体・基礎地盤	×	○	○	○	○
江合川福沼地区	堤体・基礎地盤	×	○	○	○	○
江合川平針地区	堤体・基礎地盤	○	○	×	×	○
江合川小泉地区	堤体	×	○	○	○	○
江合川関根地区	堤体	×	○	○	×	×
江合川中島乙地区	堤体・基礎地盤	×	○	○	○	○
江合川上谷地地区	堤体・基礎地盤	×	○	○	○	×
吉田川大迫地区	堤体・基礎地盤	○	○	×	○	×
久慈川本米崎地区	堤体	×	○	×	○	○
久慈川落合地区	堤体	×	○	×	×	×
那珂川下石崎地区	堤体	○	×	○	○	○
利根川三和地区	堤体・基礎地盤	×	○	○	○	○
利根川中谷地区	堤体・基礎地盤	×	○	○	×	×
江戸川西関宿地区	堤体	○	○	○	○	○

5. まとめ

閉封飽和域を抱える堤防は、経年的な圧密沈下により既に堤体下部中央が緩んでいる上に、堤防底部には場合によって水みちに発達する可能性のある液状化層が分布している。その堤防が液状化により被災した場合の本復旧工法としては、緩んでいる部分、水みちとなる可能性の残る部分を改良しなければならない。

一方、緊急復旧も含めた工法選定や予算確保等の手続きを短期間で効率的に実施するため、地震発生後の早い段階で閉封飽和域の存在を調査する必要がある。調査に当たり、液状化の発生は基礎地盤でしか起こらないという従来の思い込みに縛られることなく、被災状況の把握とその評価に努めなければならない。

また、閉封飽和域は基礎地盤の条件と堤防盛土の土質条件によって人為的に形成される恐れがあることから、改修事業等で無堤部等に新設堤防を構築する場合や現況堤防を大きく拡幅するような場合は、基礎地盤処理や堤防盛土材料の選定に十分配慮することが不可欠である。

今回の成果は、今後大地震の発生が懸念されている中で、同時多所の堤防被災発生時の初期段階における被災原因判別や復旧工法の選定等に少しでも役立つものと期待している。

■謝辞

現地調査では、河川管理者である東北地方整備局、関東地方整備局に多大なるご理解とご支援をいただき、また、調査実施時には国土技術研究センターの佐々木技術顧問、建設技術研究所の今岡亮司研究顧問及び（独）土木研究所 地質・地盤研究グループ 土質・振動チームの谷本俊輔研究員にも御同行いただき、幅広い観点から様々なアドバイスをいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 佐々木康・三浦高史・成田秋義・石戸谷信吾・木村晃・伊藤龍一・中山修・柳畑亨・佐古俊介：閉封飽和域の液状化による堤防被災過程に関する研究，河川技術論文集 第18巻，pp.333～338，2012.
- 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，河川技術論文集 第18巻，pp.327～332，2012.
- 5) 牛腸宏・橋本信仁・椎木貴敏・宮武晃司・藤田浩・菊田勇平：東日本大震災による河川堤防の被災状況について，河川技術論文集 第18巻，pp.363～368，2012.