東日本大震災における河川堤防の被災形態の特徴

The feature of forms about river levees which received damage by Great East Japan Earthquake.

宮武晃司¹・中山 修²・柳畑 亨²・谷本俊輔³・成田秋義⁴・椎木貴敏⁵

1 正会員 前(財) 国土技術研究センター 河川政策グループ(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-12-1)
2 正会員 (一財) 国土技術研究センター 河川政策グループ(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-12-1)
3 正会員 (独) 土木研究所 地質・地盤研究グループ 土質・震動チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
4 正会員 国土交通省 東北地方整備局 河川計画課(〒980-8602 宮城県仙台市青葉区二日町 9-15)
5 正会員 国土交通省 関東地方整備局 河川工事課(〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心 2-1)

We investigated feature of forms about river levees which received damage by the Great East Japan Earthquake. We found the feature of forms about river levees which received damage owing to the liquefaction inside the levee. The method of judging whether the liquefaction inside the levee is the cause from a disaster form was established. Result of this research helps initial work in case of the next major earthquake to see the feature.

Key Words : *Great East Japan Earthquake, damage of river levees, feature of forms, Report , open-cutting of levee, field investigation*

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の多くで 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とりまとめた。

また、今後の震災の復旧対応に資するよう、閉封飽和 域の液状化が原因で被災を受けた堤防の復旧方法や必要 材料及び費用について傾向を整理した。

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箇所で実 施した(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 況や、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深に水没することに よって形成された地下水位以深の領域であり、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、地下水位以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 現地調査箇所(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、一関遊水地
旧北上川	和渕地区
江合川	渕尻地区、福沼地区、平針地区、小泉地区、関根地区、中島乙地区、上谷地地区
吉田川	不来内排水樋門、羽生地区、 大迫地区
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、横利根閘門、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 涸沼川下石崎地区



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。



写真3 鳴瀬川下中ノ目地区(H24.6.12撮影)



(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 は堤体下部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、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くなっ 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



図4 横断方向広がり量と天端沈下量の関係



図6 天端沈下量と閉封飽和域厚の関係

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 部が広くなるため、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以浅に砂層が存在していることが確認され た。







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 よる被災箇所が、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

		①堤防周辺	②法尻に「は	③法面が縦	④堤防に入	⑤堤防に入
調査地区名		で噴砂痕	らみだし」	断亀裂を	ったクラ	ったクラ
(現地調査箇所の内、		がない。	が見られ	伴って数	ックに噴	ックの開
閉封飽和域の液状化	液状化の場所		る。	メートル	砂痕があ	口幅が広
が被災原因となって				以上側方	る。	<i>ل</i> ا ک
いる箇所)				流動して		
				いる。		
鳴瀬川下中ノ目地区	堤体	0	0	0	0	0
鳴瀬川木間塚地区	堤体・基礎地盤	0	0	0	×	0
江合川渕尻地区	堤体・基礎地盤	×	0	0	0	0
江合川福沼地区	堤体・基礎地盤	×	\bigcirc	0	\bigcirc	\bigcirc
江合川平針地区	堤体・基礎地盤	\bigcirc	\bigcirc	×	×	\bigcirc
江合川小泉地区	堤体	×	0	0	0	0
江合川関根地区	堤体	×	0	0	×	×
江合川中島乙地区	堤体・基礎地盤	×	\bigcirc	0	0	0
江合川上谷地地区	堤体・基礎地盤	×	\bigcirc	0	\bigcirc	×
吉田川大迫地区	堤体・基礎地盤	0	0	×	0	×
久慈川本米崎地区	堤体	×	\bigcirc	×	0	0
久慈川落合地区	堤体	×	\bigcirc	×	×	×
那珂川下石崎地区	堤体	0	×	0	0	0
利根川三和地区	堤体・基礎地盤	×	0	0	0	0
利根川中谷地区	堤体・基礎地盤	×	0	0	×	×
江戸川西関宿地区	堤体	0	0	0	0	0

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

5. 復旧工法のとりまとめ

ここまで、閉封飽和域の液状化により被災した堤防を 早い段階で把握するための着眼点について述べてきたが、 ここでは、その復旧工法を選定する際の参考情報として、 関東地整管内の4地区を対象に、実際に採用された復旧 工法及び工法毎の工事費と使用材料を表3に整理した。 それぞれ、地盤改良工は閉封飽和域を液状化しない地盤 へ改良する対策、ドレーン工は閉封飽和域内の水位を低 下させ液状化する領域を小さくする対策、鋼矢板工は基 礎地盤にも液状化層を有する場合に側方変位を抑制する 対策として選定した。なお、今回は、既に工事契約が完 了している箇所を対象に整理を行った。

堤防の大きさや被災の程度により、工事費や使用材料 量はかなりの幅を持つことがわかった。

今後の東北地整のデータも含めてさらなる分析が必要 である。

なお、施工を行った際に、いくつかの留意点が抽出さ れたため、以下に列記する。

①地盤改良工

- ◆閉封飽和域は、地下水位以下で地盤強度も小さいこ とから、施工基盤面の設定に配慮が必要。
- ◆改良体は、改良直後は一時的に強度を失っていることから、改良部の安定性や施工機械の安全性に十分な配慮が必要(閉封飽和領域直下の軟弱粘性地盤への影響も合わせて配慮)。

②ドレーンエ

- ◆ドレーン工は、地下水位と川裏の排水処理先の水路 敷高等を勘案し、堤防内の地下水を低下でき、か つ排水を確実に処理できるよう敷高、規模、堤脚 水路等を計画すること。
- ◆ドレーン工の大きさは洪水時の堤防機能に悪影響を 及ぼさないよう配慮すること。

③矢板工

◆川裏側に設置する場合は、堤体内水位の排水に影響 を与えない(堤体浸潤線を上げない)よう配慮が 必要(ドレーン工の設置、矢板への透水孔の設置 等)。

6. 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

現地調査実施時には、国土技術研究センターの佐々木 技術顧問や建設技術研究所の今岡亮司研究顧問にも御同 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。

	久慈川 落合地区	久慈川 本米崎地区	那珂川 下石崎地区	利根川 三和地区
地盤改良工	0		0	
矢板工	0	0		0
ドレーンエ		0		0

耒3	(2日された復旧工法及7)(工法毎の工事費と値田材料)
120	ホカでイレノー仮旧上広及い上広毎の上争員と反用的イヤ

盛土工	単価20~155(千円/m)、全体に対する費用割合7~19%、使用材料量5~29(m ³ /m)
地盤改良工	単価78~273(千円/m)、全体に対する費用割合17~27%
矢板工	単価40~809(千円/m)、全体に対する費用割合27~50%、使用材料量5~20(枚/10m)
ドレーンエ	単価42~52(千円/m)、全体に対する費用割合11~28%、使用材料量20~24(m ² /10m)

※工事費は直接工事費ベース

参考文献

- 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.
- 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.

(2013.4.4受付)