

河川堤防における耐震補強技術

Seismic Resistant Technologies for River Levees

佐々木 哲也 (ささき てつや)

(独)土木研究所 上席研究員

石原 雅規 (いしはら まさのり)

(独)土木研究所 主任研究員

谷本 俊輔 (たにもと しゅんすけ)

(独)土木研究所 研究員

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災では、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。このなかには、堤防機能を失うような大規模な被災も生じた。今回の地震による河川施設の被害は、特に東北地方の河川において、津波によって破堤等の甚大な被害が生じたことに加え、地震動による被害が東北地方から関東地方にかけて広域的に生じた。

地震動による堤防機能を失うような大規模な被災の原因は液状化であり、従来から被害の形態として想定されていた基礎地盤の液状化を原因とするものが多数発生した他、これまで地震による堤防の被災として主眼が置かれていなかった堤体の液状化による被災が多数発生した¹⁾。一方で、1995年兵庫県南部地震以降、河川堤防の液状化対策が進められており、対策がなされた堤防については大規模な被災は見られなかった¹⁾。

本報告では、東日本大震災による直轄河川の堤防における地震動による被害の概要、これまで進められてきた河川堤防の耐震補強の効果、今回の地震の特徴である堤体の液状化による被害の予測手法と対策手法の開発に関する取組みについて紹介する。

2. 地震動による河川堤防被害の概要

直轄河川の堤防の被害は、東北地方1 195箇所、関東地方で920箇所計2 115箇所確認された²⁾。また、直轄管理区間の被災箇所2 115箇所の中で特に被害が大きかった箇所（東北地方整備局管内29箇所、関東地方整備局管内24箇所）では緊急復旧工事が実施された。さらに本格復旧については、平成24年度出水期までに完了させる予定としている。

堤防機能を失うような大規模な被災の原因は液状化であり、液状化の発生や程度には地震動の強度、継続時間の長さや繰返し回数の多さが影響したと考えられる。特に、従来から耐震補強の対象としてきた基礎地盤の液状化を原因とするものが多数発生した他、これまで地震による堤防の被災として主眼が置かれていなかった堤体の液状化による被災が多数発生した。

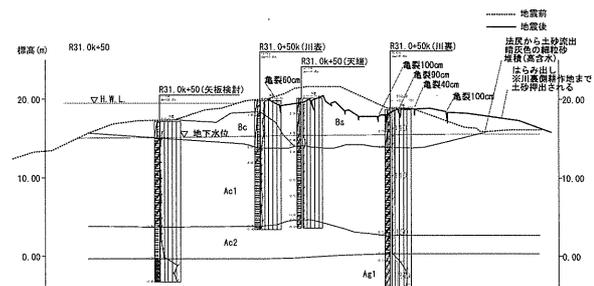
堤体液状化による被害の代表的な事例として、阿武隈川下流右岸30.6 k + 34～31.4 k + 160（宮城県角田市枝

野地先)の被災事例を紹介する³⁾。当該箇所では延長約800 mにわたり、沈下や縦断亀裂、はらみ出しが発生した。被災後の状況を写真—1に、地震後の地盤調査に基づいて作成された断面図を図—1に示す。特に大きな変状が生じた付近では写真—1に示すように、堤防天端に沈下、陥没が生じるとともに複数の縦断亀裂が生じた。天端の沈下量は最も大きなところで約2.9 mである。また、裏法に大きな水平変位が生じ、裏法尻部の水平変位量は3 mに達するところもあり、崩土は隣接する農地を覆った。このような大きく崩壊した箇所の法尻付近や堤体の亀裂底部に多数の噴砂痕が確認された。ほとんどの変状が表小段から川裏側にかけて確認されており、表小段から下には目立った変状は見られなかった。さらに、法尻のごく近傍を除き、川裏側周辺の耕作地等において、特段の変状や噴砂痕は確認されていない。

基礎地盤には層厚15 m程度の軟弱粘性土が存在する。



写真—1 河川堤防の大規模な被害（阿武隈川下流右岸30.6 k + 34～31.4 k + 160）³⁾



図—1 被災箇所の断面図（阿武隈川下流右岸30.6 k + 34～31.4 k + 160）（東北地方整備局提供資料に加筆修正）

堤体は粘性土を主体とする旧堤とその後嵩上げ腹付けされた砂質土を主体とする新堤部分からなり、変状は砂質土を主体とする新堤部分に集中していた。また、堤体が軟弱粘性土地盤下にめり込むように沈下し、地下水位が堤体内に存在している。

これらの被災状況及び地盤調査結果より、砂質土を主体とする新堤部分の地下水位より下の範囲が液状化したことが被災原因であると考えられる。

3. 河川堤防の液状化対策の効果

従来、特殊堤等を除いた通常の堤防（土堤）では耐震設計がなされていなかったが、1995年兵庫県南部地震において淀川左岸西島地区の堤防が約2 kmにわたり最大で3 m程度の沈下が生じた事例等を契機として、直轄あるいは補助河川のいわゆるゼロメートル地帯に位置する河川堤防については緊急的に耐震点検・耐震対策が進められた。

対策としては基礎地盤の液状化対策であり、堤防の側方変形を抑制して堤防の沈下量を低減することを目的として、主に堤防の法尻付近に対策が行われている。河川堤防での実績が多い工法としては、固結工法、締め固め工法、ドレーン工法、鋼矢板等により構造的に抑制する工法である。対策工の設計は「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）」⁴⁾にしたがい、設計地震動としては中規模地震動（現在で言うところのレベル1地震動）を想定しており、いずれの設計法も原則として震度法により堤防及び対策工の安定性を照査するものであった。

今回の地震で大規模な被災が生じた区間近傍にも、このような対策が施された堤防が存在している。図-2に代表的な対策箇所断面図を示す。当該箇所では川裏側法尻部にグラベルドレーンによる液状化対策が実施されているが、目立った変状は認められなかった¹⁾。

図-3は、兵庫県南部地震以降の中規模地震動に対する耐震点検により対策が必要と判定された区間のうち、対策済み区間と未対策区間における今回の地震での被災程度の割合を整理されたものである。未対策区間においては何らかの被災が49%に生じ、大規模及び中規模被災を合わせて22%程度生じているのに対し、対策区間では小規模被災が13%生じているのみで、大規模、中規模被災は生じていない。今回の地震では、一部の地域ではレベル1地震動を大きく超える地震動が観測された地域もあるが、兵庫県南部地震以降に進められてきたレベル1地震動に対する液状化対策が、今回の地震に対して効果を発揮したのと考えられる。中規模地震に対する対策工の設計は、改良範囲内に液状化を生じさせないことや、対策工が外的・内的に安定することを照査しており⁵⁾、中規模地震動に対して十分な安全余裕を確保するように設計されていたため、結果として、大規模地震動に対しても対策効果を発揮したのと考えられる。

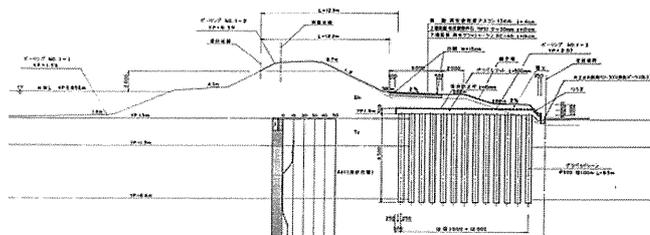


図-2 利根川右岸27.75 k-51 m～28.0 k-1 mにおける断面図（グラベルドレーンによる対策）¹⁾

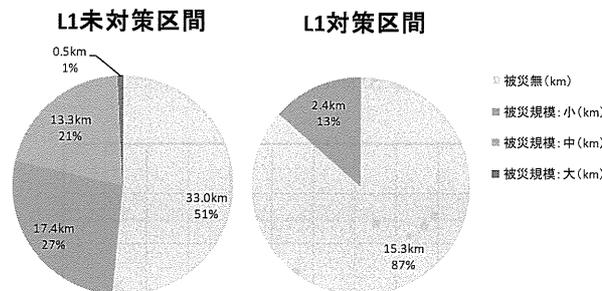


図-3 レベル1地震動に対する要対策区間における堤防の被災状況¹⁾

4. 堤体液状化による被害の予測と対策

4.1 堤体液状化による被害の予測手法に関する検討

堤体の液状化による被害は、堤体内が液状化しやすい砂質土であること、堤体内に水位があることが要因と考えられるが、東北地方太平洋沖地震による直轄河川堤防の被災箇所のうち、堤体自体の液状化が一因と考えられる箇所と近傍の無被災箇所を対象として、被災に及ぼす諸要因を分析した⁵⁾。

図-4は、被災箇所とその近傍の無被災箇所の堤体の土質について、細粒分含有率と塑性指数を整理したものである。図は堤防の沈下率（沈下量 S を堤防高 H で除したもの）毎にプロットしている。被害があった箇所については液状化判定の対象となる土質（細粒分含有率35%以下、または細粒分含有率が35%を超えても塑性指数 I_p が15%以下）がほとんどであることがわかる。ただし、塑性指数が15から20の範囲においても比較的大きな沈下率となった箇所も見られることがわかる。

図-5は、堤防の沈下率と飽和層厚 H_{sat} （堤体下端から堤体内水位までの盛土厚さ）と沈下量 S の関係を整理したものである。沈下量が大きい箇所では、飽和層厚 H_{sat} が1 m以上、かつ堤防高さの2割以上の場合に堤防の沈下量が大きい傾向がみられる。

堤体内の水位が高くなる条件としては、基礎地盤の圧密沈下や窪地等を埋めて築堤された場合など、堤体の基礎地盤へのめり込み量大きい箇所や、干拓地堤防等のように平常時より外水位が高く、常に堤体内に浸透している箇所が考えられ、実際にこのような条件の堤防で堤体自体の液状化と考えられる被害が発生している⁵⁾。

今回の地震による被害を踏まえて、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説」⁶⁾の改定及び「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」⁷⁾の策定がな

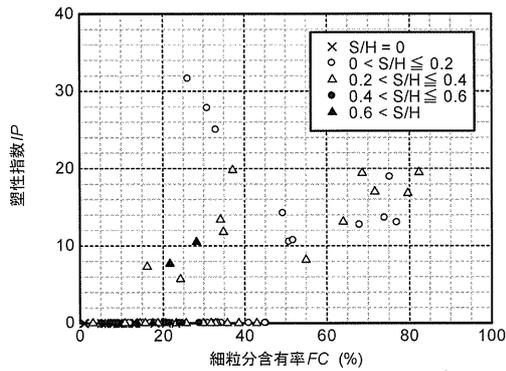
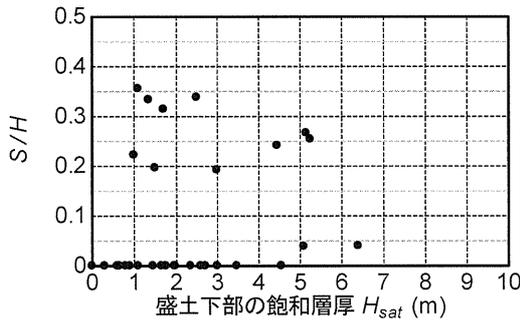
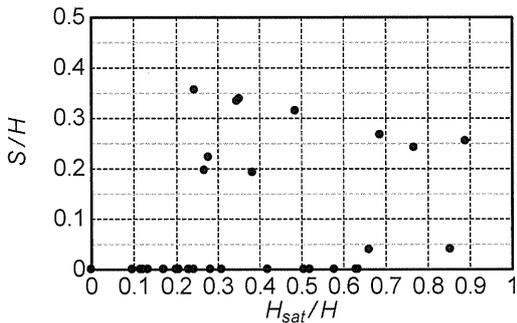


図-4 堤体下部の飽和域の細粒含有率 FC ・塑性指数 IP と沈下率 S/H の関係⁴⁾



(a) $S/H \cdot H_{sat}$ 関係



(b) $S/H \cdot H_{sat}/H$ 関係

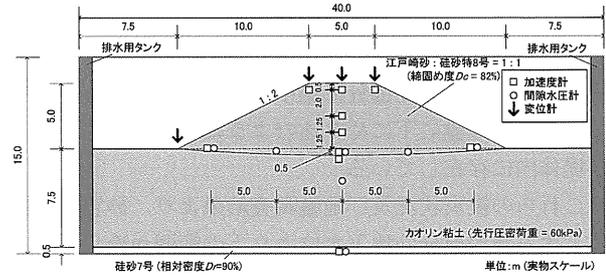
図-5 堤体下部の飽和層厚 H_{sat} と被災程度との関係⁴⁾

されているが、これらの検討結果は、堤体土質や堤体下部の飽和層厚により堤体液状化による河川堤防被害を予測する手法として取り込まれている。

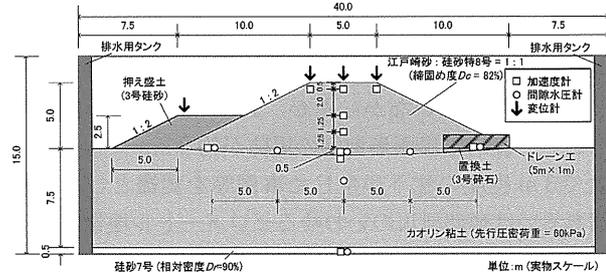
4.2 堤体の液状化対策に関する検討⁸⁾

堤体の液状化による河川堤防被害の対策について動的遠心模型実験により検討した結果を紹介する⁸⁾。堤体の液状化による被害の対策としては、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、十分な締固めを行うこと、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、法尻付近の変形を抑制する方法が考えられる。

本実験では、堤防法尻ドレーン及び押え盛土を対象として堤体液状化対策としての効果を検証した。法尻ドレーンは堤防の浸透対策として用いられており、法尻に設置したドレーンにより、法尻付近の盛土内の水位の低下、地震時の過剰間隙水圧の上昇を抑制、盛土の変形抑制効果を期待するものである。実際に、今回の地震にお



①無対策 (Case8)



②法尻対策 (Case7)

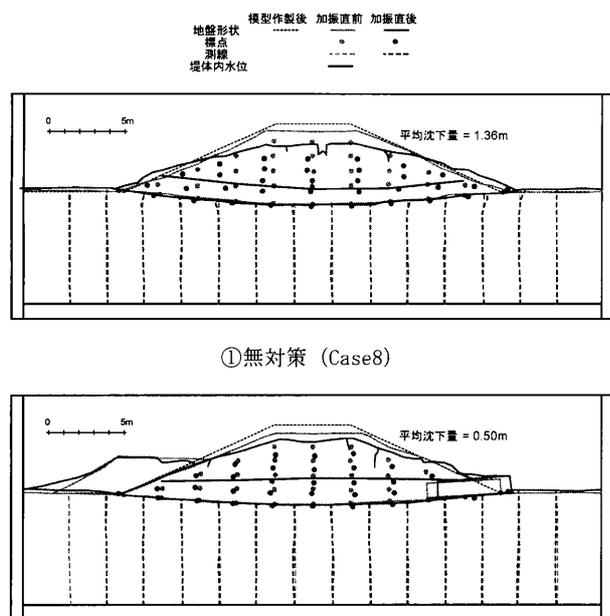
図-6 模型概要⁶⁾

いて裏法尻のドレーン工が地震時の変状を抑制したと考えられる事例もある¹⁾。しかし、河川堤防の表法に対しては、洪水時の堤体内水位の上昇や、浸透経路長の短絡によるパイピングを助長することが考えられることから、ドレーン工の適用が困難である。そこで、表法に対しては押え盛土によって変形を抑制する工法について検討した。ここで、押え盛土内の水位上昇を抑制するために、碎石による押え盛土を想定した。

実験は、50 G 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-6 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珪砂特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7.5 m、堤防高さが5.0 m、法勾配が1:2である。軟弱粘性土地盤上の盛土は、粘性土上面を下に凸の形状(堤防中央で0.5 m)に掘り込み、そこに堤防模型を作製した。

Case7 は対策工を設けたケースであり、表法に押え盛土、裏法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法からの排水を妨げないように、粗砂(3号珪砂)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号珪砂により置き換えた。

堤防模型を作製した後、遠心加速度にあわせて水の50倍の粘性を有するメトロース水溶液を用いて、脱気槽内で周辺地盤 G.L. + 1.8 m 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50 G まで上昇させ、再圧密が完了した後に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

図一七 加振前後の変形状況⁵⁾

位は、堤体下部の飽和層厚が1.3 m となるように設定した。Case7 においてはドレーン工によって堤体内水位の低下も期待できるため、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（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。

加振前後の盛土の変形状況を図一七に示す。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。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1.36 m 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、陥没が生じた。

これに対し、Case7 では天端の平均沈下量が0.50 m に抑制された。特に、表法の押え盛土に変形はほとんど見受けられない。裏法尻のドレーン工に生じた0.7 m 程度の水平変位に伴い裏法に変形が生じた。天端と法面には亀裂が生じたものの、無対策の Case8 に比べると軽微であった。

既設堤防における堤体の液状化による沈下、変形に対しては、ドレーン工や押え盛土による法尻部の変形抑制が一定の効果を期待できると考えられる。

5. 今後の課題

今回の地震による被害を踏まえて、「河川構造物の耐震性能照査指針・解説」⁶⁾の改定及び「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」⁷⁾の策定がなされ、堤体液状化による被害の診断手法が盛り込まれた

が、暫定的な部分も多い。以下に今回の地震を踏まえた主な技術的課題を示す。

- (1) 今回の地震では、継続時間の長い地震動が堤防被害を拡大させたと考えられる。一方で、現在の液状化判定法により液状化すると判定される地点においても、今次の地震において液状化が発生していない例が多く見られている⁹⁾。堤防の耐震性能照査の精度を向上と併せて、液状化強度に及ぼす地震動継続時間の影響等の解明と、液状化判定法の高度化が必要である。
- (2) 今回の地震では、堤体の液状化による大規模な被災が目立ったが、堤体の液状化による沈下、変形の定量的な評価には至っていない。堤体の液状化による被災のメカニズムの解明を進めるとともに、より合理的な照査手法の検討が必要である。また、堤体液状化に対する合理的な対策手法の開発も必要である。
- (3) レベル1地震動に対して設計された対策や浸透対策として実施した対策が、今回の地震において一定の効果を発揮した。これらを踏まえ、レベル2地震動に対する、効果的な対策工法・設計法の開発を進める必要がある。
- (4) 堤防の耐震性には、基礎地盤の条件、築堤材料、堤体内の地下水位が大きく影響するが、河川堤防は膨大な延長を有し、また長い年月をかけた数々の改築を繰り返して現在に至っており、築堤材料と基礎地盤条件が複雑であるもののその情報が十分でない場合も多い。このため、より合理的な調査法の開発と経済的な耐震診断技術の開発が重要な課題である。

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.
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川の被災状況及び復旧状況，河川，2011-9，2011.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所，(独)土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料第646号，土木研究所資料第4220号，2011.
- 4) 建設省土木研究所：河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案），土木研究所資料，No. 3513，1997.
- 5) 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，2012.6.
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説，2012.
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：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.
- 8) 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.
- 9) 国土交通省，液状化対策技術検討会議：「液状化対策技術検討会議」検討成果，2011.8.

(原稿受理 2011.11.16)