

3. 速報 東日本大震災による 河川構造物の被害特性の報告

川越 清樹^{1*}・風間 聡²・横尾 善之¹・小野 桂介²

¹福島大学大学院共生システム理工学研究科 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1)

²東北大学大学院工学研究科土木専攻 (〒980-8570 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-06)

* E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

東日本大震災の速報として、阿武隈川の堤防、福島県のアースダムの被害の調査結果とその考察を報告を行う。堤防では、特定地域に対し集中的に変状が認められていることが明らかにされた。また、特定地域は平地の蛇行河川である特徴を有しており、円弧すべりと沈下による変状が数多く確認された。いずれの現象ともに地下水が豊富に存在する旧地形の条件と痕跡が明らかにされた。アースダムに関すれば、堤体の円弧すべり、沈下による変状が数多く認められた。変状ダムは奥羽山脈東山麓に集中し、震度の強さとの関係性が示唆される。また、決壊した藤沼ダムに関しては、地震動による法面崩壊と堤体内の土層内の滑りが同時に発生した痕跡が認められた。引き続きの重点的な調査を行い解明を進める意向である。

Key Words : *Earthquake disaster, inland, dike, earth fill dam, fukushima prefecture*

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に牡鹿半島の東南東130km付近、深さ24kmを震源とするマグニチュード9.0の地震が発生した(以下 東北地方太平洋沖地震と記載する)。20世紀以降の記録を参考にすれば、東北地方太平洋沖地震は、国内において既往最大の1933年の明治三陸沖地震(推定マグニチュード8.4)を抜き、世界対象でも1960年のチリ南部地震(推定マグニチュード9.5)、2004年のスマトラ地震(マグニチュード9.3)、1964年のアラスカ(推定マグニチュード9.2)に次ぐ、最大級の地震である。この地震の発生に伴い日本列島北部の太平洋沿岸地域を中心に甚大な被害(以下 東日本大震災と記載する)が認められ、被災地では、今もお深刻な状態が続き、2011年7月5日現在で死者・行方不明者22,626名、全壊建築物106,858戸が報告されている¹⁾。概ねの被害は地震に伴う津波を起因したものであり、沿岸地域を中心に被災が集中する。また、広い範囲まで被害を波及させている福島第一原子力発電所の放射物質の外部放出も沿岸域がポイントソースとなっている。その一方で、犠牲者や被害額の面で沿岸地域よりも規模が小さいものの、強震に伴う内陸域の被害も数多く認められている。こうした被害は、脆弱な地質を呈する斜面の崩壊現象、軟弱層の液状化に伴う不等沈下、

人為的地形改変により形成された地形の変状を主な原因としている。これらの現象を包括的に捉え、地震動による地形変動と解釈できる。国土地理院の測地報告によると、東北地方太平洋沖地震は、総延長約500kmに及ぶ岩手県から茨城県の太平洋沿岸域において、海側のへ約4.0mから5.0m強(基準2011/03/01～2011/03/09平均値、最大値牡鹿5.3m)の水平変動と、0.4～1.2m程(基準2011/03/01～2011/03/09平均値、最大値牡鹿1.2m)の沈下を生じさせている²⁾。これらを起因に地殻変形に伴い十分な支持力、抵抗力の期待できない続成期間の短い人為的な造成箇所や、軟弱な沖積平野、脆弱な地質の分布する斜面が地形変動したと捉えることもできる。これらの地形は、社会活動域に密接な関係性をもち、現象単独では小規模であるものの多大な人的被害をもたらす特徴を有している。本論文では、東日本大震災において内陸域で生じた「河川堤防」、「アースダム」に示される河川構造物の被害事例を現地調査を基に報告するとともに、これらの特性を整理し、今後の整備、管理上で留意すべき点等を検討することに取り組んだ。なお、河川堤防の現地調査範囲は阿武隈川、アースダムの現地調査範囲は福島県(矢野目ダムのみは栃木県)である。

2. 河川堤防の調査結果

阿武隈川の河川堤防を例に地震由来による変状の調査結果を報告する。図-1は、阿武隈川で大きな変状の認められた堤防の位置を示している。特に被災の集中が認められているのは、宮城県角田市から丸森町と福島県の伊達市梁川町である。これらの地域は、蛇行河川を呈する低地という共通の地形特徴を有する。蛇行した形跡から侵食作用の寄与しやすい軟弱地盤が分布している可能性が高い。また、氾濫が従来より頻発していた可能性も高く、地下水も豊富であることが有力である。堤防の基礎地盤が軟弱、かつ地下水豊富であることにより、強震に伴う変状が誘発されたと推測される。阿武隈川流域で認められた地震由来の堤防の変状は大別して、以下の①、②に分類される。

① 円弧すべり(図-1の③、④、⑤、⑥、⑦)

② 沈下(図-1の①、②)

「円弧すべり」に関しては、堤防の天端をすべり面頂部とし、堤外側へ円弧すべりが派生する形状が多く認められている。円弧すべり派生箇所の多くは、堤防側近、かつ堤防裾直下に河川が存在する特徴を有している。この特徴に関すれば、河川の存在により実際に造成された堤防よりも斜面長が長くなるため、地震動による応力解放も生じやすくなる。こうした地震と地形的特徴の関係に加えて、そもそもの軟弱な地盤条件も加わり円弧すべりが数多く認められたと推測される。この典型的な事例として、図-1中③の小斉地区の状況を説明する。小斉地区の堤防変状では、堤防の天端から堤外側へ比高2.0mに及ぶ滑落崖が認められ(写真-1 参照)。円弧すべりの末端は、堤防裾下の道路を超えて、その下の河川に到達し、河道は閉塞している(写真-2 参照)。堤防下の道路は円弧すべりブロックのサイドにクラックが認められているものの、サイド以外は概ね原型をとどめたまま移動している状況である。こうした状況から円弧すべりは緩慢に移動したことが推測される。また、当該地区では、治水地形分類図³⁾より(図-2 参照)現在は埋め立てにより地形改変されているものの、かつて旧河川の川筋跡(沼地)の存在が明らかにされている。緩慢な滑動、旧河川の川筋跡の存在は、地下水が豊富に分布していたことを示唆するものである。

「沈下」に関しては、堤外、堤内の両側において堤防法面に土塊の押し出しが認められ、その結果、堤防天端が沈下している。腹み出しの土塊下には噴砂現象も認められており、堤体内の地下水上昇にともなう液状化により沈下が生じたと解釈される。図-1中①の坂津田地区の状況(写真-3 参照)を説明する。沈下の堤防の堤外、堤内に地下水湧出が顕著に認められている(写真-4、写真-5参

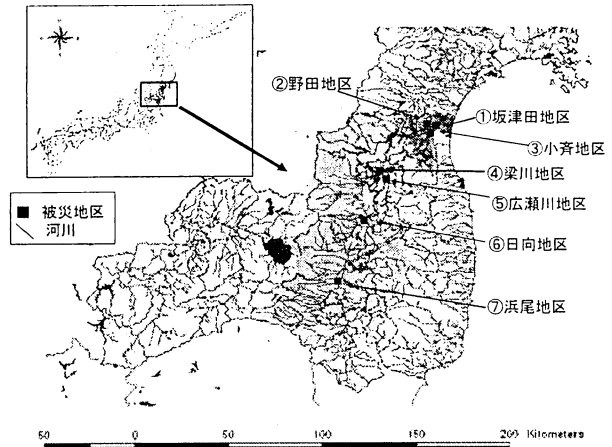


図-1 阿武隈川堤防変状位置図

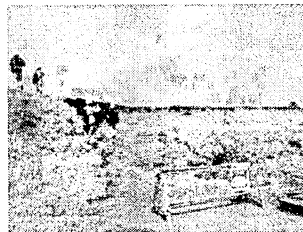


写真-1 滑落崖



写真-2 押し出しによる河川閉塞

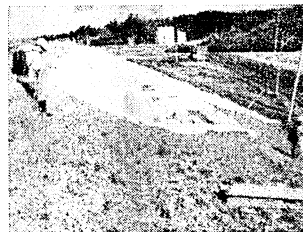


写真-3 堤内の沈下

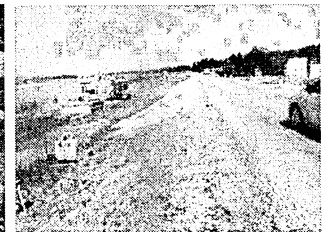


写真-4 堤外の沈下と湧水



写真-5 堤内の湧水

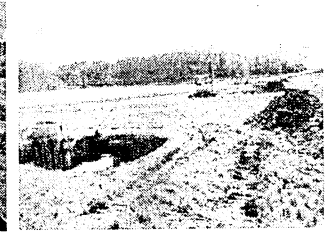


写真-6 配管の破断

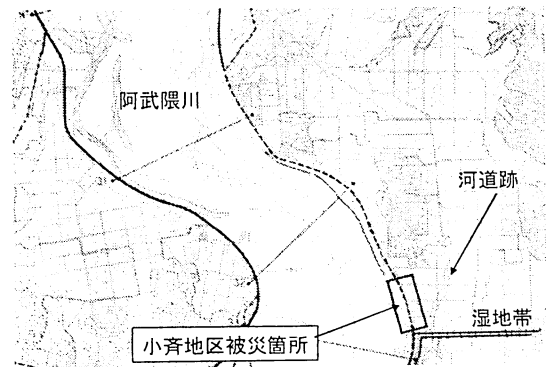


図-2 治水地形分類図による小斉地区

照)。また、堤防下の堤内地の水田内では地下水上昇に伴う配管破断が箇所で見られている(写真-6 参照)。現

場状況より、地内は地下水上昇が著しく多かったことが示唆される。また、配管破断は更なる地下水供給を行うため、沈下を助長している可能性も高い。

3. アースダムの調査結果

福島県災害対策課によると東日本大震災により694ヶ所のため池損傷が報告されている⁴⁾。福島県のため池は、平地を掘り込んで造成させる「皿池」に対して谷地形を構造物で堰き止めることで造成させる「谷池」の割合が多い特徴を有している。農畜産業が盛んである一方で降水量の少ない気候条件から、古くより「谷池」造成が進められてきた。当時の農業土木技術から土を盛立てて貯水を行う「アースフィルダム」による堰き止めが講じられてきた。こうした経緯から、福島県には、現在も老朽化したアースフィルダムが多数分布している。当時のアースフィルダムは、土塊内の間隙水圧軽減を促す排水機能、もしくは間隙水圧上昇を生じなくさせるための遮水機能に対する技術を施していないダムも多く存在する。また、土材、圧密転化等の面においても現在の技術基準に準拠できない構造のアースフィルダムも多い。そのため、耐震に対して構造が脆弱であるアースフィルダムが数多く分布する。阪神淡路大震災等のため池被害の実情をふまえて2000年の土地改良事業設計指針「ため池整備」、2004年の土地改良施設耐震設計の手引き等により補強策が進められているものの、日本列島に約21万箇所のため池の内、約2万箇所が改修必要と判定されている⁵⁾ように補強対象数が多いこと、築堤の母材そのものが経験的手法当時のものであることより整備もままならない状態にある。こうした背景もあり、東日本大震災においてもアースフィルダムの被害が数多く認められた。

3.1 藤沼ダム決壊の調査結果

東日本大震災におけるアースフィルダムの被害の中で、福島県須賀川市では、藤沼ダム決壊が認められた(図-3、写真-7,8参照)。日本国内のダム決壊は1854年安政南海地震による満濃池決壊以来の稀な事例である。藤沼ダムの決壊により、ダム下流側約1.5kmの集落が壊滅的な被害を受けており、死者・行方不明者8人の人的被災も生じている。決壊した藤沼ダムは、阿武隈川水系江花川・箕の子川支流に存在する周辺地域の最大級規模のため池を堰き止めた構造物である(有効貯水量は約150万 m^3)。堤高18.5m、堤頂長133.0m、堤体積99,999 m^3 のアースフィルダムであり、1937年に着工し、戦中を含む12年間を経過して1949年に竣工されている⁶⁾。当該ダムの直下に分布する郡山盆地は、水田地帯が広がる一方で降水量が少ない

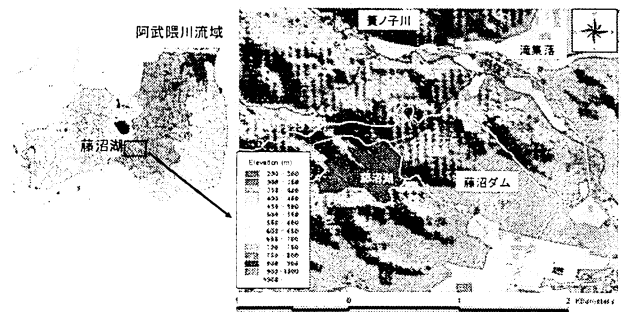


図-3 藤沼湖周辺平面

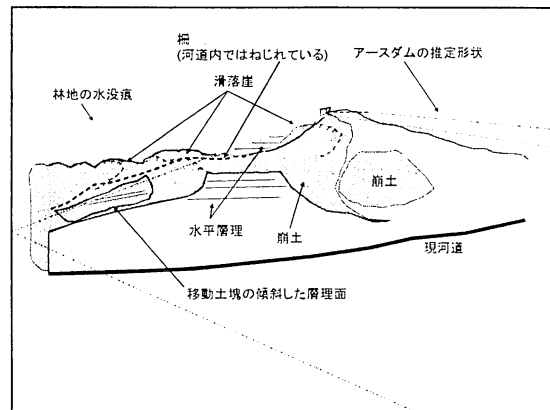


図-4 ダム右岸被災状況概況(写真-10と対比可能)



写真-7 ダム決壊全景(上空)



写真-8 ダム決壊全景



写真-9 ダム左岸側全景



写真-10 ダム右岸側全景



写真-11 ダム左岸
ベンション村の変状

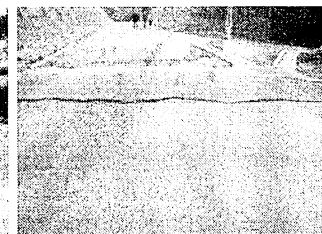


写真-12 ダム左岸圧縮亀裂

気象条件を有し、灌漑用の水資源を確保するための対策と施策が古くから講じられていた。藤沼ダムによる貯水は、下流域856haに及ぶ肥沃な水田に灌漑用水として利用され、水不足解消からの生産性の高い営農へ貢献して

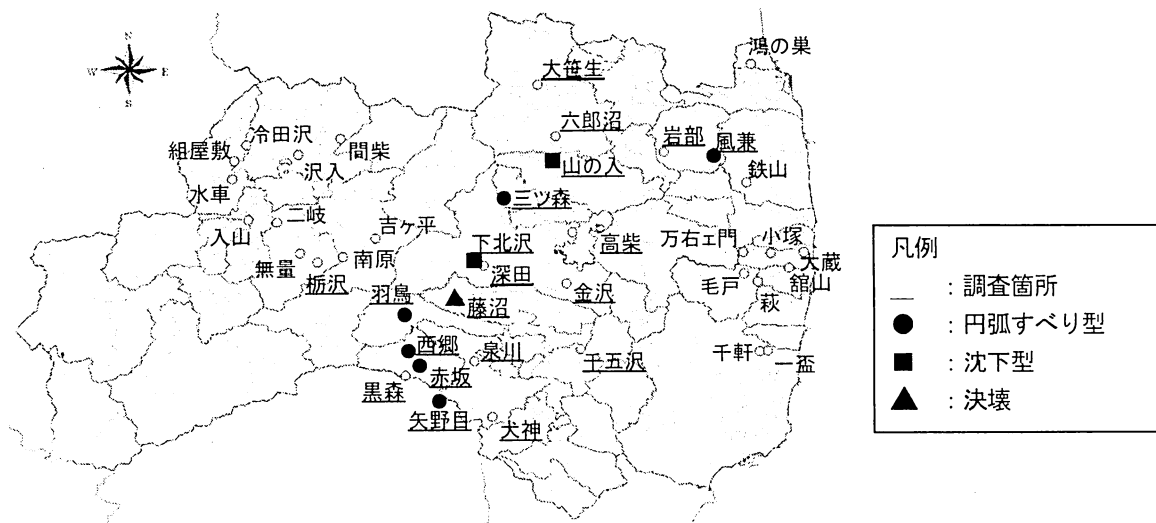


図-5 福島県内のアースフィルダム分布図

きた。藤沼ダムの決壊状況を報告すると、左岸側はダム形状が残存する(写真-9 参照)一方で、右岸側は決壊により概ねの土砂が流出した形跡を成している(写真-10 参照)。右岸に関しては、沢地形を堰き止めた形跡は皆無であり、こうした状況から右岸側から決壊したことが明らかである。図-4にダム右岸側の概況を示す。右岸側は土砂流出によりダムの形状は残存していないが、ダム前面の河道脇に押し出された土砂が堆積している。堆積した土砂には大別して3箇所の段差が認められている。堆積土砂の比高の連続性から、これらの段差は滑落崖になっていることが有力であり、土塊がスランプ状に移動した形跡が認められている。また、破壊によりアースフィルダムの内部構造を随所で確認できるが、ダムの構造は水平の層理構造(層厚20～50cm)を成している。目視より認められる土層は、腐植土層(炭化)、砂礫層、軽石混じりの火山灰が主であり、同一の構成材であっても土層により密実度、粒径等の様相は異なっている。炭層の存在は難透水層になるため、ダム堤体の間隙水圧上昇を促す作用も推測させる。決壊のメカニズムとしては、現在の段階では以下の①、②が考えられる。

- ① 地震動により法面崩壊が生じ、その後、堤体が決壊
- ② 堤体内の異なる土層内で生じた滑りによる崩壊

Case①単独の場合には、崩壊後に決壊に至るまでのタイムラグが生じていることとなる。しかしながら、住民からの状況聴取によれば、地震発生直後に土石流が集落に到達していたことを話している。また、右岸の林地には決壊による出水の痕跡が広い範囲で堤頂より約1m下に認められている。Case①の単独であれば、堤体付近の水位は堤頂付近であるものの、下流側は河床勾配にあわせて傾斜する痕跡になることが推測される。こうした状況からも、右岸アースフィルダムの決壊は、Case①と Case

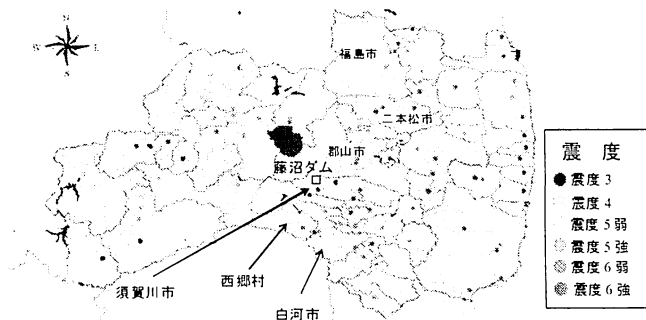


図-6 東北地方太平洋沖地震時の震度分布

②が同時に生じていたことにより生じた可能性が高い。また、Case②の同時的な発生を推測させる要因として、被災時期が3月という融雪時期であったことも挙げられる。この地区では、融雪時期に代掻き用の貯水を行うため貯水位が高い状態に設定する。そのため、水圧負荷の増加も Case②の発生を助長していた可能性も高い。こうした決壊の状況のほか、藤沼ダムの左岸側では、斜面崩壊が数多く確認されている(写真-11 参照)。また、ダム堤体方向への圧縮亀裂も認められており(写真-12 参照)、左岸側の山体自体に地震に伴う大きな変動が示唆される。今後、広範領域の変状調査も行い最終的なダム決壊の発生機構の解明に努める意向である。

3.2 福島県内アースフィルダム被災の調査結果

地震に伴い被災したアースフィルダムに関して、福島県中通り地方を中心に調査を進めた。執筆時までの調査結果を報告する。図-5 は福島県内のアースフィルダムの分布図であり、下線を記したダム名は現地調査を行った箇所である。また、変状の認められたアースフィルダムは図中凡例のマーキングを記載している。藤沼ダムを除くと概ね円弧すべり型、沈下型の2種類の変状が認め

られている。ダムの変状は、風兼ダムを除き奥羽山脈東麓斜面に分布する。ただし、奥羽山脈東麓斜面に分布するアースフィルダムに変状があるわけではない。基本的に奥羽山脈東麓北部に関しては変状は少なく、福島県の中央から南部に関すれば、深田ダム、泉川ダム、黒森ダムといった変状の認められないアースフィルダムも一部で存在している。こうした地域の特徴には地震動との関連性も高い。図-6 は気象庁より発表された東北地方太平洋沖地震時の震度⁷⁾を分布図として示したものである。震度分布から相対的に福島県の中央から南部の奥羽山脈東麓斜面は震度 6 弱、6 強を記録した地域が多く分布する。震度記録の他に、防災科学技術研究所による東北地方太平洋沖地震による強振動のレポート⁸⁾を参考にとすると、藤沼ダムの分布する須賀川市周辺の K-NET 白河で地震時の 7 番目 (1425gal)、KiK-net 西郷で 8 番目 (1335gal) の最大加速度が観測されている。これらの機関の報告からも福島県中央から南部の奥羽山脈東麓斜面には強震が生じていたことが明らかである。ただ、こうした中でも部分的な領域で強震の認められていない状況が図-6 より把握することができる。南部地域で被災の認められていないアースフィルダムは部分的に存在していたこと、また、こうした強震が生じにくい安定的な地質に存在していたことなどが推測される。加えて、貯水池の水位状況やダム構造を考慮して安定した原因の解明に努める意向である。

アースフィルダムの被災は大別すると円弧すべり型、沈下型の 2 つに大別されるが、今回の被災により認められたこれらの典型的な事例を報告する。円弧すべり型として西郷ダムの事例を説明すると、ダム天端にダムサイト両岸まで至るクラックが認められている(写真-13)。堤体を挟んで両側で円弧すべりが認められるが、上流側のすべりの活動が大きく、段差も上流側に下がった形状を成している。堤体上流側法面は石積み護岸となっているが、法面上部では押し出した形跡があり、ややふくらみが認められる(写真-14)。末端側には噴砂の痕跡も認められる。沈下型として山の入ダムを説明すると、地震による新鮮な亀裂ではないものの、堤体に沈下の跡が認められている(写真-15)。また、堤体裏面法面のロック材も一面が均一勾配ではなく浮き沈みが認められる(写真-16)。ダム全体として相対的に円弧すべり型による被害は亀裂、段差が明瞭に認められる大規模な変状、沈下型の変状は不明瞭な小規模な変状の傾向を示している。

4. 考 察

内陸域の震災被害状況の中から河川堤防、アースフィルダムの変状を報告した。



写真-13 ダム堤体のクラック

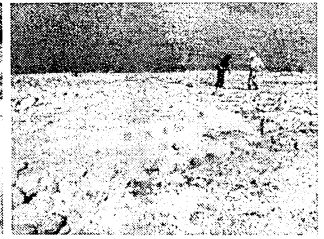


写真-14 ダム法面の押出し

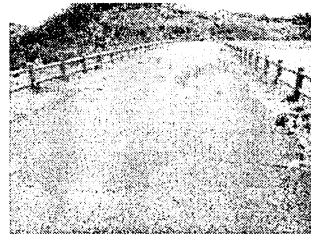


写真-15 堤体の沈下

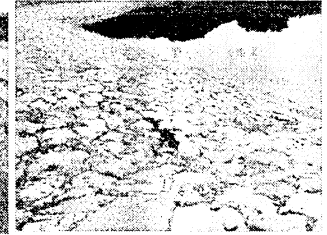


写真-16 法面岩材の浮上がり

これら河川構造物の被害は、日本観測史上最大の東北地方太平洋沖地震を素因に生じているが、河川堤防にすれば変状を誘発しうる旧河道、湿地帯という旧地形、アースフィルダムは老朽化、代掻き時期の貯水池の満水位、ダムの存在しうる地質状況も影響している可能性が高いことも明らかにされた。既に社会基盤設備として供用されているものの、再度、こうした構造物と周辺環境のかかわりを確認すること、特にダムに関しては水位や堤体挙動を管理する手法も見直すことも必要であることを示している。こうした過程の中で地震にも対応できる河川整備を進めることが提案される。

また、本文中で藤沼ダムの決壊事例の報告は現象論のみにとどまっているが、ダム直下の流線沿いに集落が存在していたこと、衝撃増加させる林地や土砂(水田)がダムと集落に存在していたことで多大なる被害が認められている。林地はある程度の速度までは水勢の緩衝効果をもたらすが、過剰な流れは植生そのものを抜根させるまでに至り緩衝効果を見込めなくさせる。既に水工学分野でこうした植生検討がなされてきたが、今まで決壊までは波及しにくいと考えられてきたアースフィルダムの最大限のリスクを考慮した場合、アースフィルダム決壊による影響に対する安全管理上で林地配置の検討も加える必要がある。河川堤防、アースフィルダムともに損傷した場合、河道からの流水が広い範囲まで被害を波及させる危険性を有する。先に記述した河川整備に関しても、最大限のリスクも踏まえた検討を行うこと、それに備えた対策オプションを用意することも必要といえる。

執筆現在も引き続き被災の調査を継続している状況である。今後も被災の発生機構、その影響の解明に努め、具体的な河川整備提案に努めたい意向である。

謝辞：本調査は水工学委員会東北関東大震災調査団、お

よびの水文水資源学会東日本大震災対応調査研究グループ「地震によるアースフィルダムの被害諸特性と今後の影響に関する調査」(代表者：川越清樹)の支援を受け実施された。また、調査を通じて国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所、福島河川国道事務所、ならびに阿武隈川上流土地改良区の協力を得た。ここに謝辞を表す。

参考文献

- 1) 首相官邸：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震(東日本)について，<http://www.kantei.go.jp/saigai/pdf/20110705700jisin.pdf>. (Cited 2011/07/05).
- 2) 国土地理院：平成 23 年（2011 年）3 月 9 日 11 時 45 分頃の三陸沖の地震に伴う地殻変動について，http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_sanriku.html (Cited 2011/07/05).
- 3) 国土地理院：治水地形分類図，<http://www1.gsi.go.jp/geowww/lcmfc/lcmfc.html>(Cited 2011/07/05).
- 4) 福島県農林水産部：東北地方太平洋沖地震による農林水産部公共施設等被害について，http://www.cms.pref.fukushima.jp/download/1/230427_aff_higai-02.pdf(Cited 2011/07/05).
- 5) 奥野日出・木戸口勝・小林正幸：老朽ため池堤体の改修に関する合理的設計手法の提案，全地連「技術 e-フォーラム 2003」さいたま講演資料，pp.87-88，2003.
- 6) 日本ダム協会：ダム便覧，<http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html>(Cited 2011/07/05).
- 7) 気象庁：最近の有感地震，http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/db_map/index0.html(Cited 2011/07/05).
- 8) 防災科学技術研究所：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による強震動，http://www.kyoshin.bosai.go.jp/Kyoshin/topics/html/20110311144626/main_20110311144626.html(Cited 2011/07/05).