

農業用幹線水路の施設管理における 大規模地震災害に備えた減災対策

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム ○大久保 天
本村 由紀央
立石 信次

幹線水路施設管理における大規模地震時の減災対策を明らかにするため、頭首工と開水路からなる典型的な幹線水路施設を対象に、大規模地震時の災害対応行動を阻害するリスクの特定および対策の検討を行った。その結果、施設管理における減災対策として、設備機器の操作ミスなどに対するヒューマンエラー対策や水管理システムにおける水位観測設備の増設などが挙げられた。さらに、発災直後における被害情報収集の場面では、施設管理者と地域住民、行政機関の連携が必要であることが示唆された。

キーワード：大規模地震、災害対応、FTA

1. はじめに

東日本大震災では数多くの農業水利施設が被災した¹⁾。その被害は基幹的な農業水利施設にもおよび、福島県須賀川市の藤沼湖(ため池)の決壊²⁾では、死者および行方不明者を出す惨事となった。震災時における最悪の事態を想定すれば、人命に関わる同様な災害が、大流量の開水路や高圧のパイプラインなどの農業水利施設においても起こり得る。それゆえ、万一の大規模地震災害に備えて、基幹的な農業水利施設における危機管理体制を整備することが急務である。

阪神・淡路大震災を契機に「レベル2地震動³⁾」に対する施設構造物の耐震設計が進められている。ただし、耐震設計により担保される施設の耐震性や安全性には限界がある⁴⁾。そこで、万一施設が損傷を受けても、その後の災害対応により二次災害を最小限に抑止する減災対策が必要になる⁵⁾。

しかし、大規模地震時には災害対応もまた十分な機能を果たすことができない可能性がある。災害対応は、それに必要な資源である人、情報通信、設備機器、インフラ、エネルギーのすべてが健全に機能することにより遂行される。そのため、大規模地震時に電話の不通や停電、設備機器の故障などの被害が発生すれば、災害対応そのものが遂行不能に陥ることが考えられる。このことから、大規模地震時に備えて、施設の耐震化を進める一方で、その施設管理における災害対応力を強化する施策もまた必要である。しかし、これまでに災害対応に関わる資源の被災を想定して、災害対応計画を策定している事例はみられない。

大規模地震時の被害に対する災害対応力を高めるためには、既存の災害対応行動を阻害する様々なリスクを洗い出して、そのリスクに対する対策を講じる必要がある。筆者らは、これまでに具体的な農業用幹線水路施設における災害対応を対象に、大規模地震時に起こり得るリスクの検討を行ってきた⁶⁾。そこでは、信頼性工学の一手法であるFTA⁸⁾(Fault Tree Analysis:故障の木解析)を適用して、災害対応の遂行を阻害するリスクの一部を特定した。本研究では、同手法を用いて大規模地震時の災害対応に関わるリスクの全容を明らかにするとともに、そのリスクを低減する対策を検討した。とくに、本研究ではその対策検討において、現場の施設管理の中で実施可能な対策は何かを明らかにすることに主眼をおいた。

2. 方法

(1) FTAの実施手順

FTAとは、分析対象とするシステムにおいて、発生することが望ましくない事象を出発点として、その発生原因を順次辿っていくことで、最終的な原因となる事象(以下、「リスク源」)を網羅的に明らかにしていく方法である。FTAはFT図の作成により、機械設備からヒューマンエラーまで、様々なリスクの因果関係を整理できる⁹⁾ことから、多様な資源が関連する災害対応のリスク分析を行う方法として適当であると考えられる。FTAにより災害対応に関わるリスク源を特定し、そのリスク源に対する対策を施すことができれば、大規模地震時の災害対応の遂行が阻害される確率を低減することができる。

本研究では、FTAによるリスク分析を①分析対象の理解、②FT図の作成、③対策検討の手順で実施した。次

に各手順について説明する。

(2) 分析対象の理解

分析対象のシステムを明確にして、そのシステムの構成要素の機能および特徴を理解する。本研究では、北海道の水田地帯における頭首工と開水路で構成される典型的な幹線用水路であるS幹線用水路施設を分析対象とした。その水路延長は約29km、最大計画通水量は21m³/sである。筆者らは、S幹線用水路施設を管理する土地改良区の職員（以下、「施設管理者」）に、災害時における施設管理や災害対策について聞き取り調査を実施し、その結果に基づいて、大規模地震災害時に想定されるS幹線用水路水路に関する災害状況および災害対応について整理した。

(3) FT図の作成

FTAは表-1に示す記号を用いて、図-1に示すようなFT図の作成することを基本とする。この場合、Fが頂上事象、Aが中間事象、B1、B2、Cが基本事象（リスク源）である。まず、対象とする故障や失敗など望ましくない事態を頂上事象Fとして設定する。次にその頂上事象Fが起り得る直接的な原因となる事象（この場合は中間事象Aと基本事象C）を挙げて、それを頂上事象Fの下位に並べて書き出す。このとき、頂上事象Fの直下のOR記号は、中間事象Aまたは基本事象Cのいずれか一方の事象が生じた場合に、頂上事象Fが発生することを意味す

表-1 FT図作成に必要な記号

記号	名称	内容
□	頂上事象 中間事象	頂上事象:分析対象とする事象 中間事象:上位事象の原因となる下位事象
○	基本事象 (リスク源)	これ以上展開不能な最小レベルの事象
∪	OR記号	入力事象のうち1つが発生する場合に出力事象が発生
∩	AND記号	入力事象のすべてが発生する場合に出力事象が発生

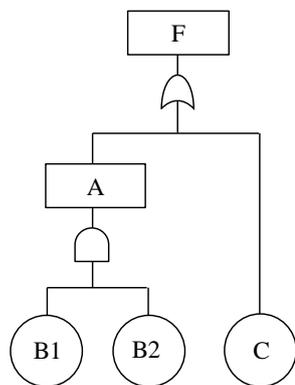


図-1 FT図の一例

る。それに対して、中間事象Aの直下のAND記号は、基本事象B1、B2の両方が発現すれば中間事象Aが生じることを意味する。

こうして描かれたFT図は、頂上事象からその下位の中間事象、基本事象へと樹木の枝のように拡大していくところから故障（失敗）の木、すなわちFault Treeと命名されている。FT図は膨大かつ複雑なリスクの発現原因の連鎖を整理でき、そのリスク間の関連性やリスクの発現経路を視覚的に確認できる利点を有する。

なお、FT図の作成には、分析対象を熟知した技術者が必要であるとともに、発想の公平性や網羅性を達成するため、複数人のメンバーが必要である。本研究では、施設管理者を含む数名の技術者によりFTAを実施した。

(4) 対策検討

FT図により明らかとなったリスク源に対して、そのリスク源の顕在化を低減する対策を検討した。また、本研究では各リスク源の構造重要度を求めて、対策の重要性を評価する上での参考とした。

構造重要度とは、着目するリスク源が頂上事象の発生に与える影響の強さを示す指標である¹⁰。構造重要度は、リスク源が非生起状態から生起状態に変化したときの頂上事象が発生する割合の差分であり、次の(1)式ように表せる。

$$C = \frac{A - B}{2^{N-1}} \quad (1)$$

ここで、C：対象とするリスク源の構造重要度、A：対象とするリスク源が生起状態のとき頂上事象が生起される状態の組合せの数、B：対象とするリスク源が非生起状態のとき頂上事象が生起される状態の組合せの数、N：リスク源の数である。

3. 結果および考察

(1) 大規模地震時に想定される災害状況および災害対応

S幹線用水路水路で想定している災害状況および災害対応を整理した結果は、次のとおりである。

大規模地震時に幹線用水路において生じ得る二次災害として、水路からの溢水が想定される（図-2）。水路の破損や法面崩壊により水路が閉塞されれば、そこから大量の水が溢水することになる。このとき、同時に広域的な停電となれば、水路内の揚水ポンプが一斉に停止することになり、そのため溢水量が増加して、災害の状況はさらに悪化するものと考えられる。住宅や幹線道路の近傍を幹線用水路が通過する箇所では、用水路からの溢水による社会的影響は絶大である。

このような事態が万一発生することを想定して、大規模地震発生直後に施設管理者が直ちにとるべき対応（以下、「震災時緊急対応」）は、二次災害の脅威となる水害リスクの元を断つこと、すなわち頭首工の取水ゲート

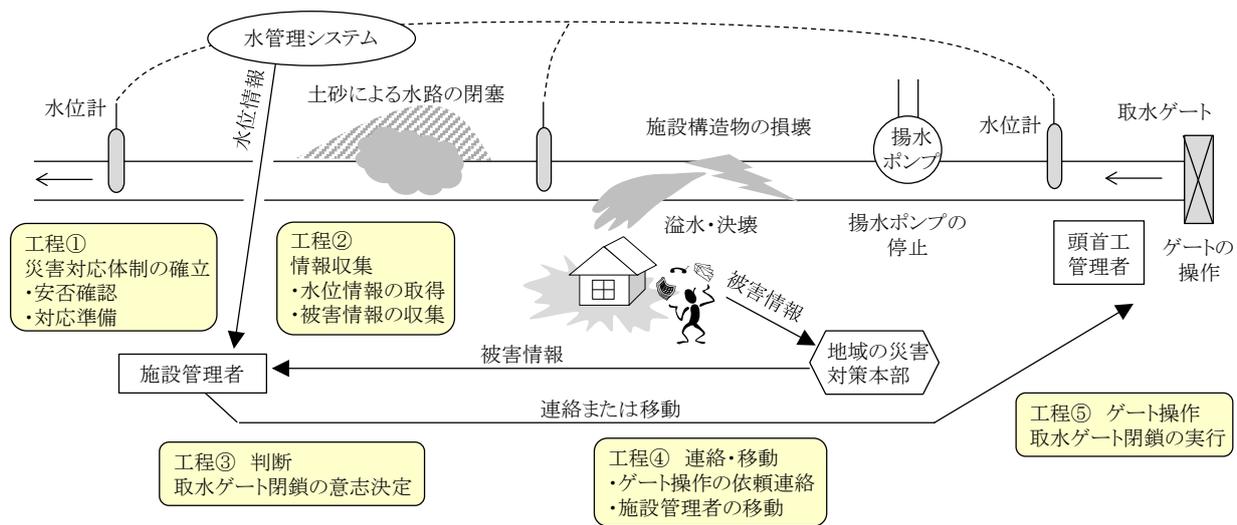


図-2 大規模地震時において想定される災害状況および災害対応工程

を緊急閉鎖することである。図-2に示すように、震災時緊急対応は工程①～⑤の5段階の工程に整理できる。地震発生後、震度4以上であれば、災害対応の体制を確立する(工程①)。施設管理者は家族や関係者の安否および自らの対応行動開始の可否を確認する。次に、施設管理者は幹線用水路施設の被害の有無を確認する(工程②)。現地の被害状況は通常時の水管理を支援するための水管理システムを用いて把握する。水管理システムの監視モニターは土地改良区事務所に設置されているが、施設管理者が所持する携帯電話においても幹線用水路の水位を確認することができる。また、水路で起きている被害情報を電話で受けとる場合も考えられる。このとき、被害情報は地域の行政機関に設置された災害対策本部を経由して、施設管理者に届くものと想定される。施設管理者は水管理システムにおける水位データの値が急変するなどの異常を示した場合、あるいは被害通報を受けた場合には、直ちに通水を停止すると判断して、取水ゲート閉鎖に向けた対応行動を開始する(工程③)。施設管理者は、まず取水ゲートの緊急閉鎖を依頼するため、頭首工管理者に連絡をとる。このとき、頭首工管理者への連絡が不通である場合は、施設管理者自らが頭首工管理所へ急行する(工程④)。連絡を受けた頭首工管理者あるいは頭首工管理所へ到着した施設管理者は、取水ゲートを閉鎖するための操作を行う(工程⑤)。

以上に示した災害対応が支障なく遂行できれば、幹線用水路の被害に起因する二次災害の拡大を抑制することができる。

(2) FTAによるリスク源の特定

震災時緊急対応に関するFTA図を図-3に示す。地震被害による水路からの溢水に起因する二次災害が生じている状況であれば、施設管理者は直ちに取水ゲートを閉鎖する対応を行う。そこで、本研究では「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象に設定した。取水ゲートの閉鎖が実

行されるためには、前節において述べた工程①～⑤の各工程が確実に実施されなければならない。それゆえ、頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」が発生する第1の原因は、工程①～⑤の各工程がそれぞれ実施不能になる場合である。すなわち、「対応行動開始の困難」、「被害情報収集の困難」、「判断の誤り」、「取水ゲート操作者の不在」および「取水ゲートの動作不能」が中間事象として挙げられる。

これらの各中間事象について、その発生原因となるリスク源の特定を進めた。ただし、本研究では、リスク源の追求を施設管理において対策可能な範囲までとし、その範囲を超える事象がFTA図上に得られた場合、その時点における事象をリスク源とした。例えば、「対応行動開始の困難」の原因である「施設管理者の被災」に対する対策は、個人レベルの備えによるところが大きいことから、「施設管理者の被災」をリスク源とした。

施設管理者が中間事象「被害情報収集の困難」に陥る原因は、情報の発信側と受信側の双方におけるそれぞれの不具合が考えられる。それゆえ、「被害情報収集の困難」を生じさせる事象として、受信側の「情報端末の不具合」および発信側の「的確な情報発信の困難」が挙げられた。施設管理者における被害情報の取得手段は水管理システムおよび外部からの被害通報である。そのため、水管理システムの不具合や被害情報の不的確な伝達および情報の送受信に関わるトラブルがリスク源として挙げられた。

「判断の誤り」は、幹線用水路において被害が発生しているにもかかわらず、取水ゲートを閉鎖しないと判断してしまうことである。施設管理者は「水位が正常範囲にある」かつ「被害通報がない」ことを確認した場合に取水ゲートを閉鎖しないと判断する。その判断材料となる情報と実際の被害状況が乖離する原因として、現状の水位データでは、被災後の急激な水位変化を捉えきれないことや被害情報の発信および情報経路におけるトラブル

表-2 各リスク源の構造重要度およびリスク低減対策

リスク源	構造重要度 ($\times 10^{-3}$)	リスク低減対策	対策の枠組
電話の使用不能	1.70	ヒューマンエラー対策	施設管理において実施可能な対策
防災無線の使用不能	1.02		
電動操作のミス	2.89		
手動操作のミス	1.79		
管理モニターの損傷	1.70	転倒防止などの対策	施設管理において実施可能な対策
観測機器の不具合	2.18	地震による故障対策	
観測計器の誤表示	3.24	水位観測設備の増設 水位データ取得回数の高頻度化	
水位データの不足	3.24		
地域の災害対策本部立ち上げの遅延	2.18	地域行政の危機管理対策の強化	地域住民や行政機関との連携が必要な対策
被害情報の紛失	1.40	地域住民との災害対応計画の策定	
被害情報の不明確な伝達	2.18		
被害認知の困難	1.40		
操作人員の不足	1.80	地域からの応援	
施設管理者の被災	5.09	住宅など建物の耐震化	社会インフラや施設構造物などに関わる対策
被害情報の発信困難	1.39		
頭首工管理者の被災	1.02	情報通信機能の強化	
電話回線の不通	5.09		
データ通信の不通	2.18	道路施設の耐震強化	
道路の不通・混雑	3.06		
電動設備の故障	2.89	設備機器の耐震強化	
バックアップ電源の故障	0.96		
手動設備の故障	1.79	電力システムの耐震強化	
停電	0.96		
ゲート施設の破損	5.09	施設構造物の耐震化	

施設構造物や社会インフラに関わる対策：施設管理者が、情報通信や道路の不通など社会インフラの被害あるいは住宅や施設構造物の損壊に対するリスク低減対策を直接的に実施できるものではない。「施設管理者の被災」、「電話回線の不通」および「ゲート施設の破損」は、構造重要度が最も高い値を示した。すなわち、これらのリスク源は災害対応の阻害要因として最重要と評価される。それに対して、「停電」の構造重要度は最も低い値となった。その理由は、停電時のバックアップ電源を有するとともに、電力供給が停止しても手動によるゲート操作が可能であり、すでに3重の代替手段が備えられているためである。施設管理の中で社会インフラの被害に対する対策を行うとすれば、停電対策と同様に、何らかの代替手段を考えることになる。このことに関しては、本研究の今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、幹線用水路施設を対象に、FTAを適用して、大規模地震時における災害対応の遂行を阻害するリスクを特定し、そのリスク低減対策を示した。本研究の結果から得られた対策の大枠を次にまとめる。

- (1) 施設管理において実施可能な対策は、既存の防災計画や災害対応計画の中に反映できる。とくに、水位観測設備の増設など水位観測の拡充・強化を図る方が重要である。

- (2) 施設管理者と地域住民および地域行政の協力・連携体制を確立することが必要である。その実現のためには、施設管理者と地域住民とのリスクコミュニケーションや行政機関との議論と調整が必要である。
- (3) 施設構造物や社会インフラの被害に対するリスク低減対策は、施設管理において実施できるものではない。既存の対応工程の中に代替手段を用意して、リスクを回避するような新たな災害対応過程の構築を検討する必要がある。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局札幌開発建設部農業整備課には、調査地の選定や資料の提供などにおいてご支援を頂いた。調査対象とした幹線用水路施設を管理する土地改良区には、聞き取り調査およびFTAによるリスク分析作業においてご協力を頂いた。ここに記して関係者各位に深く感謝申し上げます。なお、聞き取り調査およびリスク分析作業は、筆者らのほか（株）ルーラルエンジニアの担当者が主体となって実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 鈴木尚登、中里裕臣：平成23年（2011年）東日本大震災における農村工学研究所の対応と農地・農業用施設等の被害実態、農村工学研究所技報、213、pp. 1-21、2012。
- 2) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会：藤沼湖の決壊原因調査報告書、2012。
- 3) 土木学会（参照2014. 12. 24）：土木構造物の耐震基準等に関する提言、1995、入手先<<http://www.jsce.or.jp/committee/earth/>>
- 4) 農林水産省農村振興局整備部設計課：土地改良施設耐震設計の手引き、2004。
- 5) 日本技術士会：減災と技術—災害の教訓を活かす—、日本技術士会、pp. 81-82、2005。
- 6) 大久保天、本村由紀央、中村和正：大規模災害時を想定した農業水利システムの管理に関する考察、北海道開発局技術研究発表会、2012。
- 7) 大久保天、本村由紀央、中村和正、小野寺康浩：大規模地震時における災害対応の遂行を阻害するリスク源の特定—幹線用水路施設を対象としたリスクマネジメント—、農業農村工学会論文集、No. 290、pp. 33-42、2014。
- 8) 小野寺勝重：国際標準化時代の実践FTA手法 信頼性、保全性、安全性解析と品質保証、日科技連、pp. 1-17、2007。
- 9) 塩見 弘、島岡 淳、石山敬幸：FMEA、FTAの活用（日科技連信頼性工学シリーズ第7巻）、日科技連、pp. 44-46、2005。
- 10) 益田昭彦、青木茂弘、幸田武久、高橋正弘、中村雅文、和田浩：新FTA技法、日科技連、pp. 106-109、2013。

