

大規模農業用水利システムにおける地震等緊急時の管理技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：水利基盤チーム

研究担当者：中村和正、大久保天、
本村由紀央

【要旨】

東日本大震災をはじめ過去の大規模な地震災害では、多くの農業水利施設が被災した。万一の大規模地震に備えて、基幹的な農業水利施設における災害対応力を強化することが喫緊の課題である。そこで、本研究では、大規模地震等緊急時に備えた管理システムの開発と管理体制の提案を目的とする。平成 26 年度の研究では、水田地域における大流量の開水路施設と畑地域における高圧のパイプライン施設を対象に、FTA を用いて、大規模地震時における災害対応の遂行を阻害する原因の全容を明らかにするとともに、その対策効果の解析・評価を行った。その結果、開水路施設では、震度 6 弱以下の震災であれば、既存計画の災害対応がほぼ支障なく遂行できるが、震度 6 強以上の震災となれば、既存計画どおりの災害対応の遂行が困難となる可能性が高まり、さらに震度 7 では、現状の施設管理において実施可能な対策を講じて、災害対応の遂行が不能になる確率をほとんど低減できないことが示された。このことから、開水路施設では、既存計画の災害対応の遂行に支障が生じた場合に備えた事業継続計画の必要性が示唆された。一方、パイプライン施設では、震度 7 の状況下においても既存の災害対応が阻害される確率が 0.55 となった。ただし、それは緊急遮断弁による自動化に大きく依存した結果であり、ひとたび緊急遮断弁が適切に作動しないとすれば、震度 6 強以上の地震動において施設管理者による災害対応行動はほぼ確実に阻害されることが示された。このことから、パイプライン施設においても、事業継続計画の必要性が示唆された。

キーワード：大規模地震、開水路、パイプライン、災害対応、FTA

1. はじめに

大流量の開水路や高圧のパイプラインなどの基幹的な農業水利施設が大規模な地震により被害を受ければ、広範囲にわたる営農への影響が懸念されるばかりでなく、その被災箇所から流出する多量の水が水害リスクとなって、地域住民の財産や生命に関わる重大な被害を引き起こすことが考えられる。東日本大震災をはじめ過去の大規模地震災害では、多くの農業水利施設が被災した¹⁾²⁾³⁾。活断層プレート沈み込み帯に位置する我が国においては、同レベルの大規模地震が全国各地で起こり得る⁴⁾。震災の被害により社会的影響が大きいと想定される大規模な農業水利施設においては、万一の大規模地震の発生に備えて具体的な対策を講じておくことが必要である。

阪神・淡路大震災以降、レベル2地震動、すなわち「構造物の供用期間中に発生する確率は低いものの極めて激しい地震動⁵⁾」に対する施設構造物の耐震設計が進められてきた。しかし、大規模地震に伴う災害過程は、不測の事態を引き起こす複雑な現象である。それゆえ、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⁶⁾。そこで、万一施設が被災しても、その後の災害対応により被害拡大を最小限に抑止する減災対策が重要になる⁷⁾。しかし、大規模地震時には、その災害対応に必要な資源となる人、情報通信、設備機器、インフラ、エネルギーもまた被災してしまうことが想定される⁸⁾。現在、地域防災計画において、震災時の災害対応がマニュアル化されているが、そのほとんどは災害対応に必要な資源がすべて健全に機能することを前提に計画されている⁹⁾。それゆえ、現状のままでは、大規模地震時には災害対応自体が機能不全に陥り、迅速な災害対応が実施できない可能性がある。したがって、大規模地震時における災害対応の遂行を確実なものにするため、発災直後の同時多発的な資源の被災に備えた新たな災害対応計画の策定が必要である。

そこで、本研究では、大規模な農業水利施設を対象に、レベル 2 地震動相当の大規模地震等緊急時に備えた管理システムの開発と管理体制の提案を目的とする。本研究の平成 25 年度までの実施概要は、次の(1)～(3)のとおり

りである。

- (1) 既往の資料や文献をもとに、灌漑用水路施設（開水路、パイプライン）が、震災時に被害を受けた条件や場所を整理した。また、実際の施設管理者への聞き取り調査から、大規模地震時において想定される用水路の決壊や破損による二次災害過程を明らかにした。さらに、その災害過程の視点から、調査対象とする用水路施設沿線を踏査して、大規模地震時に起こり得る具体的な被害リスクを特定した。また、施設管理に関わる設備機器の構成、動作および操作手順について現地調査を実施して、大規模地震時において想定される各設備機器の故障リスクや操作上のヒューマンエラー、および施設管理者による対策実施の可否を明らかにした。
- (2) 地震時における管水路中の水撃圧は、パイプラインの被災要因のひとつと考えられる。しかし、供用中のパイプラインにおいて、地震時の水撃圧を観測した事例はほとんどない。そこで、地震時におけるパイプライン中の水撃圧の実態把握を目的として、供用中のパイプライン施設において地震時の水撃圧データを取得するための観測を現地2箇所にて実施した。同観測では、パイプライン屈曲点付近の空気弁施設に水圧計と加速度計を設置して、それぞれ定期的に100Hzにてデータを取得中である。
- (3) 具体的な幹線用水路の施設管理者を対象にした聞き取り調査の結果から、大規模地震時の施設管理における災害対応の流れを整理した。その災害対応の流れ図上に、大規模地震時に想定される被害リスクを記したリスクマップを作成して、震災時の災害対応の遂行を阻害するリスクの全体像を把握した。さらに、リスクマップ上に挙げたリスクの発現原因を明らかにするため、FTA（Fault Tree Analysis：フォルトツリー解析）を用いた原因特定を試行した。これにより大規模地震時において、既存の災害対応の遂行を阻害する原因の一部を特定し、その具体的な対策を明らかにした。また、その成果を大久保ら¹⁰⁾にとりまとめて公表した。

以上の(1)および(3)の調査において取得したデータとその分析結果を踏まえて、平成26年度の研究では、水田地域における大流量の開水路施設と畑地域における高圧のパイプライン施設を解析対象に、FTAを用いて、大規模地震時における災害対応の遂行を阻害する原因の全容を明らかにするとともに、その対策実施の意義を明らかにするため、対策効果の解析・評価を行った。本報告では、同研究の内容と成果に関して述べ

る。なお、(2)のパイプライン中の水撃圧観測では、平成26年度も継続的にデータを取得しているが、地震時におけるデータの蓄積が十分ではないため、本報告では具体的な説明を省略する。

2. 平成26年度研究の目的と方針

2.1 目的

本研究では、解析対象とする用水路施設管理における大規模地震時の対策を明らかにするとともに、その導入効果を評価して、対策実施の意義と課題を明確にすることを目的とする。ただし、平成26年度の研究では、以下に述べる観点から災害対応に関する大規模地震対策を検討した。

2.2 防災計画と事業継続計画

大規模地震時における災害対応計画の策定には、防災計画と事業継続計画というふたつのアプローチがある。防災計画とは、震災時に既存の災害対応が計画どおり遂行されるように、想定される被害の発生を未然に防止するための対策を実施する計画である。事業継続計画とは、大規模な震災時において災害対応が計画どおり遂行できない状況となっても、その代替手段をあらかじめ用意することにより、最重要な対応の継続を目指すあるいは対応が一時中断してもある目標時間内に対応を再開することを目指す計画である¹¹⁾。

東日本大震災以降、とくに事業継続計画の重要性が強調されている。国や自治体では事業継続計画の策定マニュアル（例えば、国土交通省水管理・国土保全局下水道部¹²⁾、内閣府防災担当¹³⁾）を整備して、その普及に努めており、静岡県交通基盤部農地局¹⁴⁾や徳島県¹⁵⁾など土地改良施設を対象とした事業継続計画策定マニュアルも作成されている。ただし、事業継続計画はあくまで既存計画の災害対応が遂行不能になった場合の対応行動を計画するものである。防災計画と事業継続計画は、いわば災害対応計画の前半と後半に相当する¹⁶⁾。それゆえ、第一に既存計画の災害対応に関わる被害低減の施策を実施する防災計画を策定し、その上で想定される厳しい被害状況に対して事業継続計画を策定することが適当であろう。

そこで、本研究では、防災計画の観点から既存の災害対応計画における大規模地震対策を検討・評価した。そして、その評価結果から事業継続計画の必要性を確認した。

2.3 対策実施の制約

既存の災害対応計画を見直して大規模地震対策を策定するためには、既存計画の災害対応が大規模地震時

において遂行不能となる原因を究明して、その原因発生を防止するための対策を検討する必要がある。そこで挙げられた対策を適切に講じることができれば、大規模地震時において既存の災害対応が阻害される確率を低減することができる。ただし、その対策を実施するために投入できるコストや労力には限界がある。それゆえ、挙げられた大規模地震対策のすべてを実施することは現実に不可能である。実際には、施設管理の現場における現状の予算と労力の許容をこえる対策の実施は、特別な場合を除いて困難であると考えべきである。すなわち、現実的な大規模地震対策は、施設管理の枠組みの中で比較的容易に実施可能な対策に限られよう。

そこで、本研究では、第一に施設管理において実施可能な対策に主眼をおいて、その対策効果を評価した。ただし、とくに重要度が高いリスク事象に関しては、ある程度のコストと労力をかけても対策を実施する意義があると考えて、それが施設管理の範囲をこえた対策であってもその効果を併せて評価した。

3. 方法

3.1 FTAの概要

施設の供用期間中に施設管理者が大規模地震に遭遇する機会は極めてまれであり、実際の震災経験から対策を検討して、その効果を検証することは現実的に不可能である。そのため、机上の検討にならざるを得ないものの、実施可能な対策を抽出し、その効果に一定の評価を与えることができる方法が求められる。本研究では、その要求にアプローチする有効な方法として、信頼性・安全性評価手法のひとつである FTA (Fault Tree Analysis) を適用した。

FTA とは、解析対象における望ましくない事象（以下、「頂上事象」）を出発点として、その発生原因となる事象（以下、「中間事象」）を FT 図と呼ばれる樹形状の図に整理していくことで、根本的な原因となる事象（以下、「基本事象」）を特定し、その基本事象に対する適切な対策を明らかにする方法である¹⁷⁾。FTA は、機械設備の故障からヒューマンエラーまで複合的な事象を統一的に解析することができるので、多種多様な資源が関連する震災時の災害対応過程を解析する手法として適当である。

本研究では、FTA を①解析対象の把握、②FT 図の作成、③対策の検討および評価の手順で実施した。

3.2 解析対象の把握

本研究では、次の①、②の灌漑用水路施設における

大規模地震時の災害対応計画を解析対象とした。

①水田地帯における頭首工と開水路からなる水路延長約 29km、最大計画通水量 21m³/s の用水路施設（以下、「S 開水路施設」）

②畑地帯におけるダムとパイプラインからなる水路延長 250km、最大計画通水量 3.39m³/s の用水路施設（以下、「M パイプライン施設」）

筆者らは、それぞれの施設管理者に、震災時に想定される用水路施設に関わる被害状況や災害対応計画について聞き取り調査を実施し、その結果に基づいて、大規模地震時に想定される災害状況および災害対応について整理した。

3.3 FT 図の作成

FTA は、表-1 に示す記号を用いて、図-1 に例示するような FT 図を作成することを基本とする。この場合、F が頂上事象、A および B が中間事象、C、D、E が基本事象である。C は中間事象 A と B に共通した基本事象である。最初に、解析対象の目的達成を阻む望ましくない事象を頂上事象 F として設定する。次に、頂上事象 F が起こり得る直接的な原因となる事象を挙げて、それを頂上事象 F の下位に並べて書き出す。この場合は中間事象 A および B である。このとき、頂上事象 F の直下の AND ゲートは、中間事象 A および B がともに生じた場合に、頂上事象 F が発生することを意味する。中間事象 A が生じる原因は、基本事象 C および D である。この場合は、OR ゲートで結合されて

表-1 FT 図に使用される記号

記号	名称	内容
□	頂上事象 中間事象	頂上事象：解析対象とする事象 中間事象：頂上事象と基本事象の間の事象
○	基本事象	これ以上展開不能な最小レベルの事象
∩	ORゲート	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ゲート	入力事象のすべてが発生する場合に出力事象が発生

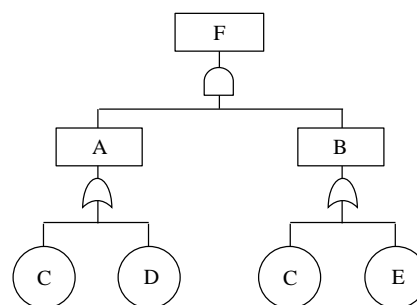


図-1 FT 図の例

いるので基本事象CとDのいずれかひとつが発生すれば中間事象Aが生じる。中間事象Bについても同様に基本事象CとEのいずれかひとつが発生すれば中間事象Bが生じる。

以上の規則に従い FT 図を作成することにより、中間事象の連鎖を辿りながら潜在的な原因となる基本事象を明らかにすることができる。なお、FT 図の作成には、発想の公平性・網羅性を確保するため、複数名による作業が望ましい。本研究では、各調査対象の施設管理者を含む5~7名の技術者により FT 図を作成した。

3.4 対策の検討および評価

3.4.1 対策の検討

FT 図により明らかとなった基本事象の発生を防止する対策について検討を行う。その際に本研究では、現場の施設管理において実施可能な対策の抽出に主眼を置いて、対策項目の分類・整理を行った。

FTA では、FT 図における各事象に発生確率を与えることで、頂上事象の発生確率を算出できる。また、その結果をもとに、頂上事象の発生に各基本事象が寄与する割合を示す確率重要度およびクリティカリティ重要度を算出できる¹⁸⁾。本研究では、これらの算出結果より重要度の高い対策の抽出および対策効果の評価を行った。

3.4.2 FT 図の簡略化

FT 図が複雑化すると、同一の基本事象が重複して現われる場合がある。そのような場合には、頂上事象の発生確率、確率重要度およびクリティカリティ重要度を正しく計算することができない。なぜならば、計算上では重複した基本事象を独立した複数の基本事象とみなしてしまうためである。そこで、次のようなブール代数による論理計算方法を用いることで、基本事象の重複を解消した FT 図を作成する。

ブール代数は明確に「真」または「偽」の2つの状態をとる論理変数とその論理演算からなる代数系である。FT 図における各事象は、「生じる」あるいは「生じない」の2つの状態をとる論理変数であり、その事象間を関係付ける AND ゲートおよび OR ゲートは論理演算に対応する。したがって、FT 図における事象間の論理関係は、表-2 に示すブール代数の記号および公式を用いて数式化され、演算を繰り返すことにより簡略化される¹⁹⁾。この手続きを行うことにより、基本事象の重複を含む FT 図から、数学的に等価な基本事象の重複を含まない FT 図へ変換することができる。例えば、図-1 の FT 図をブール代数式に変換して簡略化すれば、

表-2 ブール代数の基本公式

名称	記号/公式
論理変数	A, B, C, \dots
論理演算	ORゲート:論理和「+」で表示: $A+B+C+\dots$ ANDゲート:論理積「 \cdot 」で表示: $A \cdot B \cdot C \dots$
交換則	$A+B=B+A, A \cdot B=B \cdot A$
結合則	$A+(B+C)=(A+B)+C, A \cdot (B \cdot C)=(A \cdot B) \cdot C$
吸収則	$A \cdot (A+B+C+\dots)=A, A+A \cdot B \cdot C \dots=A$
分配則	$A \cdot (B+C+\dots)=A \cdot B+A \cdot C+\dots$
その他	$A \cdot A=A, A+A=A, A+1=1, A \cdot 1=A$

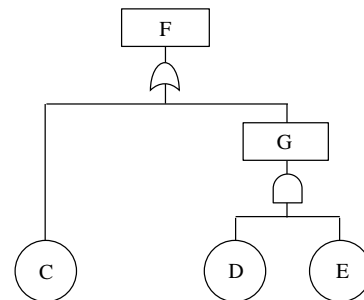


図-2 ブール代数により簡略化した FT 図

$$\begin{aligned}
 F &= A \cdot B \\
 &= (C + D) \cdot (C + E) \\
 &= C \cdot C + C \cdot E + D \cdot C + D \cdot E \\
 &= C + C \cdot E + D \cdot C + D \cdot E \\
 &= C + C \cdot D + D \cdot E \\
 &= C + D \cdot E
 \end{aligned} \tag{1}$$

となる。ここで、 F, A, B, C, D, E は、図-1 における F, A, B, C, D, E の各事象に対応する論理変数である。(1) 式をもとに FT 図を作図すると、図-2 のように基本事象の重複がない FT 図となる。ただし、中間事象 G は修正された FT 図に適した内容に書き換えられる必要がある。

3.4.3 頂上事象の発生確率

FT 図における任意の事象の発生確率 P は、その発生原因となる N 個の事象の発生確率 P_1, P_2, \dots, P_N を用いて、AND ゲートの場合では (2) 式により、OR ゲートの場合では (3) 式により算出される。

$$P = \prod_{n=1}^N P_n \tag{2}$$

$$P = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_n) \tag{3}$$

すなわち、FT 図上の基本事象に各発生確率が与えられれば、(2) 式および (3) 式を用いて、下位事象から上位事象の発生確率を順次計算していくことにより、最終的に頂上事象の発生確率を算出することができる。例えば、図-2 において、基本事象 C、D、E の発生確率をそれぞれ P_1 、 P_2 、 P_3 とすれば、頂上事象 F の発生確率 P は (4) 式のように計算される。

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2 P_3) \quad (4)$$

3.4.4 確率重要度

確率重要度とは、各基本事象の発生が頂上事象の発生に寄与する度合いを示す指標である。対象とする n 番目の基本事象の確率重要度を PI_n とすると、その基本事象の発生確率 P_n の変化に対する頂上事象の発生確率の変化と定義され、(5) 式により表される。

$$PI_n = \frac{\partial P}{\partial P_n} \quad (5)$$

3.4.5 クリティカリティ重要度

確率重要度が大きい基本事象の発生確率を低減できれば、頂上事象の発生確率を効果的に低減できる。しかし、もともと発生確率が小さい基本事象の発生確率をさらに低減することは、発生確率がもともと大きい基本事象の発生確率を改善することより困難である。このことが確率重要度には反映されていないことから、クリティカリティ重要度が定義されている。すなわち、対策実施の余地も含めて対策効果を評価する指標がクリティカリティ重要度である。本研究では、基本事象の発生確率を低減する実施可能な対策を探索することから、クリティカリティ重要度の評価に重点をおく。

対象とする n 番目のクリティカリティ重要度 CI_n は、頂上事象の発生確率 P に対する基本事象の発生確率 P_n の割合を確率重要度 PI_n に乗じることで、(6) 式のように表される。

$$CI_n = \frac{P_n}{P} PI_n \quad (6)$$

3.4.6 評価対象とする地震動の想定

農林水産省・農業農村工学会⁹⁾によれば、レベル 1 地震動とは概ね震度 5 強から震度 6 弱、レベル 2 地震動とは概ね震度 6 弱以上（最大地震動：震度 7）である。本研究では、異なる地震動規模において災害対応

の遂行が阻害される確率を比較するため、気象庁²⁰⁾に示される震度 5 強、震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の各震度階級における頂上事象の発生確率を算出するとした。また、確率重要度およびクリティカリティ重要度は、震度 6 強における値を算出して評価した。

4. 結果および考察

4.1 頭首工と開水路からなる用水路システム (S 開水路施設)

4.1.1 大規模地震時における災害過程と災害対応

(1) 灌漑期における施設管理の概要

S 開水路施設の管理に必要な主要設備は、図-3 に示すように取水ゲート、揚水機、分水ゲート、放流ゲートおよび水管理システムである。土地改良区の施設管理者は、通常時、水管理システムに表示される用水路内 6 地点の水位を監視する。S 開水路の起点となる頭首工の管理所には、その頭首工管理を委託された管理者（以下、頭首工管理者）が勤務している。降雨や水需要の変化により水位が大きく変化すると、施設管理者は頭首工管理者に取水ゲート操作を指示して、用水路全体の流量調整を行う。ただし、休日や夜間など、頭首工管理者が管理所に不在のときは、施設管理者自らが移動して取水ゲートの操作を行う。また、通常時、取水ゲート操作は電力系統を電源とするが、停電時に備えてバックアップ電源を用意している。さらに、手動による取水ゲート操作も可能である。揚水機および分水ゲートの操作は、各支線の管理者により適宜行われている。なお、以上の各種ゲートおよび揚水機の操作は、すべて機側操作である。また、灌漑期には、2 名の管理者が用水路沿線を 1 日 2 回の巡回を行って、施設全体の目視点検を行う。

(2) 災害過程

S 開水路施設が被災した場合に発生する二次災害として、図-4 に示すような決壊や溢水による水害が想定

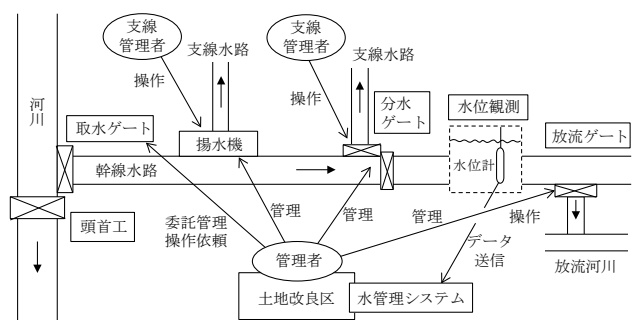


図-3 S開水路施設の施設管理の概要

される。水路構造物の損壊や法面崩壊により流路が閉塞されれば、そこから多量の水が流出することになる。このとき、同時に広域的な停電が発生すれば、用水路内に設置されている複数の揚水ポンプが一斉に停止することから水路内の流量が増加して、決壊あるいは溢水による二次災害の被害状況をさらに深刻化するものと考えられる。このような事態が地域の住宅地や主要道路の近傍において生じたとすれば、その社会的影響は絶大である。

(3) 災害対応

大規模地震発生直後に施設管理者が行う災害対応行動は、用水路施設に関する被害情報を収集して、前項に述べたような事態が発生している場合には、直ちにその水害リスクの元を断つため、頭首工における取水ゲートを閉鎖することである。図-5に大規模地震発生直後の災害対応の流れを示す。主要な災害対応の工程は①～⑤の5段階に整理できる。震度4以上の地震が

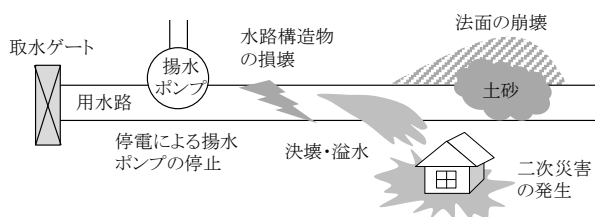


図-4 大規模地震時に想定される災害過程

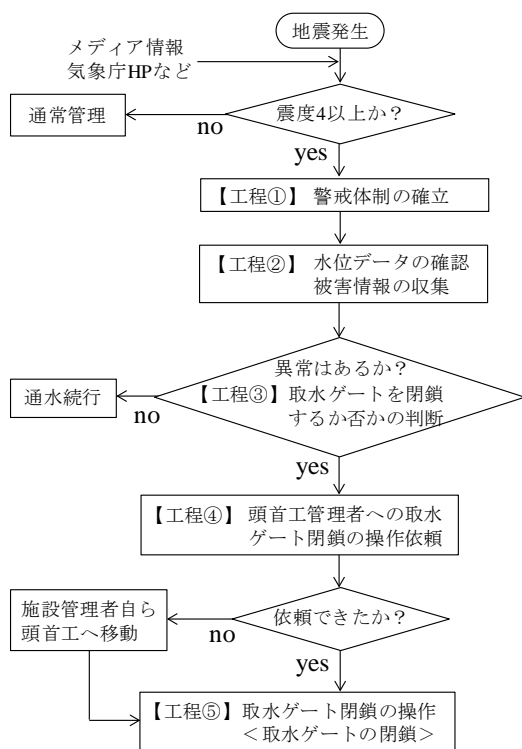


図-5 大規模地震発生直後の災害対応の流れ

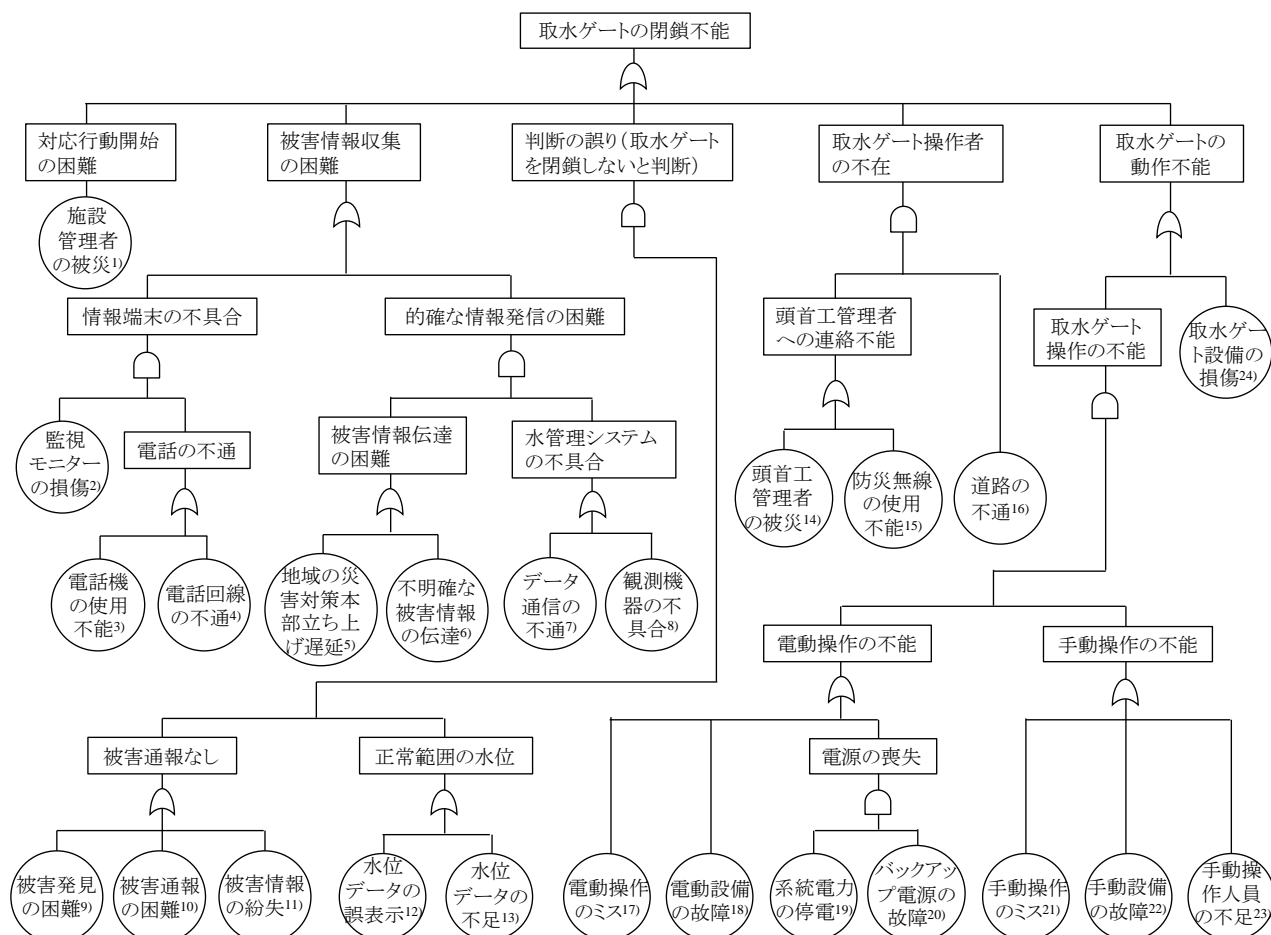
発生すれば、施設管理者は災害対応の体制を確立する（工程①）。次に、用水路施設における被害の有無を把握するため、施設管理者は通常時の水管理と同様に水管理システムにおける水位データを監視する（工程②）。施設管理者は内勤中であれば、事務所内に設置されているモニターにより用水路の水位を監視するが、外勤中や勤務時間外であっても自らが所持する携帯電話において水位を確認することができる。施設管理者は、水位の急激な変化など異常が認められた場合、あるいは外部から被害通報があった場合には、通水を停止すると判断（工程③）して、取水ゲート閉鎖に向けた対応行動を開始する。本施設の取水ゲートは機側操作であるため、必ず誰かが頭首工の操作室まで行き、取水ゲートを操作しなければならない。施設管理者は、まず取水ゲートの閉鎖を依頼するため、頭首工管理者に連絡する（工程④）。頭首工管理者への連絡が不能である場合は、施設管理者自らが頭首工の操作室へ急行する。そして、頭首工管理者あるいは施設管理者は、頭首工の操作室にて、取水ゲートを閉鎖するための操作を行う（工程⑤）。

以上の災害対応が計画どおり遂行できれば、震災時においてS開水路施設の被害に起因する二次災害の拡大を防止することができる。

4.1.2 FTAによる基本事象の特定

大規模地震災害により万一施設構造物が被災した場合、施設管理者は直ちに頭首工における取水ゲートを閉鎖して、決壊や溢水による二次災害の拡大を防止する。そこで本研究では、この取水ゲートが閉鎖できない状況、すなわち、「取水ゲートの閉鎖不能」をFTA図の頂上事象として設定した。図-6に頂上事象を「取水ゲートの閉鎖不能」とするFTA図を示す。取水ゲートの閉鎖が実行されるためには、前節で述べた災害対応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」が発生する第一の原因として、災害対応の各工程が実行不能となる事象である「対応行動開始の困難」、「被害情報収集の困難」、判断の誤り（取水ゲートを閉鎖しないと判断）、「取水ゲート操作者の不在」および「取水ゲートの動作不能」を取り上げた。これらの中間事象は、その何れかひとつでも発生すれば頂上事象が起こることから、ORゲートを用いて頂上事象と結合した。

以上に挙げた各中間事象についてFTA図を展開し、その発生原因となる基本事象の特定を進めた。ただし、本研究では、基本事象の追求を施設管理に関わる範囲までとし、その範囲を超える事象がFTA図上に得られ



1)施設管理者自身およびその家族や近親者、あるいは自宅など重要財産の被災、2)事務所内の水位データ監視モニターの転倒などによる損傷、3)携帯電話の充電切れや電話機の不携帯など施設管理者のヒューマンエラー、4)固定電話および携帯電話の不通、5)被害通報は地域の災害対策本部を経由して施設管理者に届くと想定し、災害対策本部の立ち上げ遅延による被害情報伝達の遮断、6)施設管理者が被害通報を受けても内容が不明確である状況、7)各水位観測機器からの水位データの通信不能、8)観測機器の不具合による水位確認不能、9)夜間や人が少ない場所における被害発生、10)被害発見者が被災している状況で通報が困難、11)震災時の混乱による情報伝達過程における被害情報の紛失、12)水位観測機器が誤表示をしているにもかかわらず、施設管理者はそれを正常値と認識している状況、13)被災による急激な水位変化を捉えるためには、水位観測地点数が不足している状況、14)頭首工管理者自身およびその家族や近親者、あるいは自宅など重要財産の被災、15)施設管理者と頭首工管理者の連絡手段である防災無線の使用不能、16)頭首工管理者に取水ゲート操作を依頼できず、施設管理者が頭首工へ急行する場合の道路の不通、17)電動操作（通常時の操作）で取水ゲートを閉鎖する場合の操作ミス、18)地震動による電動設備の故障、19)通常時の電源である系統電力の停電、20)系統の停電に備えたバックアップ電源の故障、21)手動による取水ゲート操作のミス、22)地震動による手動設備の故障、23)手動操作は単独の管理者が行うことは困難、24)取水ゲートの躯体自体の変形や損傷

図-6 「取水ゲート閉鎖の不能」を頂上事象とする FT 図

た時点で、その事象を基本事象とした。例えば、「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ものであるから、「施設管理者の被災」を基本事象とした。

施設管理者が「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不具合が考えられる。それゆえ、受信側の中間事象として、「受信端末の不具合」を、発信側の中間事象として「的確な情報発信の困難」を挙げた。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通報の送受信に関わるトラブルが基本事象として特

定された。

「判断の誤り（取水ゲートを閉鎖しないと判断）」は、用水路施設において実際に被害が発生しているにも関わらず、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「被害通報なし」かつ「正常範囲の水位」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に不整合が生じる基本事象として、現状の水位観測地点数では被害箇所における水位の異常を十分に捉えられない可能性があることや被害情報の発信および情報伝達過程におけるトラブルなどが考えられた。

S 開水路施設の取水ゲートは機側操作であるので、

現地勤務の頭首工管理者か、あるいは施設管理者が頭首工へ急行して取水ゲートを操作しなければならない。そこで、「取水ゲート操作者の不在」については、頭首工管理者と施設管理者が取水ゲート操作室に到達できない、あるいは操作できない状況が基本事象として挙げられた。

「取水ゲートの動作不能」となる状況として、取水ゲートの操作機能が不能になる場合と取水ゲートの躯体設備自体が損傷して可動不能となる場合が考えられる。取水ゲートは電動により動作するが、電力供給が喪失された場合には手動による操作も可能である。基本事象には、それらの設備機器の操作ミスや故障などの事象が特定された。

以上のように、FT 図を作成することにより、頂上事象から中間事象の連鎖を通じて基本事象、すなわち既存の災害対応が大規模地震時に遂行不能になる原因を特定した。

4.1.3 基本事象に対する対策

(1) 対策の分類

FT 図の作成により特定した各基本事象に対する対策を表-3に示す。本研究では、実現性が高い対策として、第一に施設管理において実施可能な対策を抽出した。さらにそれ以外の対策を、地域住民および行政機関との連携が必要な対策と施設構造物や社会インフラの耐震強化対策にそれぞれ分けて整理した。

(2) 施設管理において実施可能な対策

電話機や防災無線が使用できない状況や機械設備の操作ミスは、震災時のパニック状態における施設管理者のヒューマンエラーにより生じると考えられる。そのための対策として、震災時のパニック状態においてもミスが生じにくいシステムの再構築が必要である。水位観測機器などの故障リスク対しては、地震動に対する転倒防止や固定などの対策を施すことのほか、振動を受けた場合や異常水位となった場合における観測計器の誤作動の有無や動作特性を事前に確認しておくことが重要である。また、現状の水位観測地点におけるデータだけでは、発災時における水路内の水位変化を速やかに捉えることができない可能性がある。この対策として、現地調査やシミュレーションにより適切な水位観測地点を推定して、水位観測設備の増設を検討する必要がある。これらの対策実施には、コスト負担と施設管理者の労役を要するものの、施設管理の枠組みの中において実施可能であると考えられる。

(3) 地域住民および行政機関との連携が必要な対策

長大な水路施設における被害の第一発見者の多く

表-3 基本事象に対する対策

基本事象	対策	対策の枠組
電話機の使用不能	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		
電動操作のミス		
手動操作のミス		
監視モニターの損傷	転倒防止などの対策	施設管理、地域住民および行政機関の協力・連携が必要な対策
観測機器の不具合	震動による故障対策	
水位データの誤表示	水位観測設備の増設	
水位データの不足	地域行政の危機管理対策の強化	
地域の災害対策本部立ち上げの遅延	被害情報の紛失	施設管理、地域住民および行政機関の協力・連携が必要な対策
不明確な被害情報の伝達	地域住民との災害対応計画の策定	
被害発見の困難	地域行政からの応援	
手動操作人員の不足	施設管理者の被災	
被害通報の困難	住宅など建物の耐震化	施設構造物や社会インフラの耐震強化に関する対策
頭首工管理者の被災	電話回線の不通	
電話回線の不通	情報通信機能の強化	
データ通信の不通	道路の不通	
道路の不通	道路施設の耐震強化	施設構造物や社会インフラの耐震強化に関する対策
電動設備の故障	バックアップ電源の故障	
バックアップ電源の故障	設備機器の耐震強化	
手動設備の故障	系統電力の停電	
系統電力の停電	電力系統の耐震強化	施設構造物の耐震化
取水ゲート施設の損傷	施設構造物の耐震化	

は地域住民である。その被害情報は地域の災害対策本部を通じて施設管理者に到達するものと考えられる。それゆえ、施設管理者への被害情報の到達を確実なものにするためには、地域住民の協力体制の確立や行政機関の危機管理対策の強化が必要である。また、取水ゲート設備の操作を手動により行わなければならない状況となれば、人員不足に陥ることが考えられる。その場合の応援体制を計画しておくことが望まれる。

(4) 施設構造物や社会インフラの耐震強化対策

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を低減する対策は、基本的に耐震強化対策である。これには社会全体の強靱化が必要であり、施設管理者が単独で、その耐震強化対策を直接実施できるものではない。

4.1.4 基本事象の発生確率の設定

頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を算出するため、各基本事象の発生確率を設定した。表-4に震度5強、震度6弱、震度6強、震度7の震災時に

表-4 基本事象の発生確率

番号	基本事象	基本事象の発生確率				基本事象の発生確率の設定根拠
		震度5強	震度6弱	震度6強	震度7	
①	管理者の被災 被害通報の困難 頭首工管理者の被災	0.000	0.005	0.070	0.350	施設管理者や被害発見者が対応行動を開始できない状況としては、当人の被災だけでなく家族や知人の被災、家屋などの重要財産の被災も考えられる。そのため、震災時における建物の倒壊に等備であるとして、その発生確率には、横田ら ²¹⁾ における木造住宅(1982年以降の建物・新築年)の全壊率を適用した。
②	連絡・通信の遮断 電話回線の不通 データ通信の不通	0.000	0.007	0.092	0.460	東京都 ²²⁾ における震災時の被害想定では、電話回線の不通率は電柱折損率から求めており、その電柱折損率は建物の全壊率に比例するとしている。そこで、通信機能の支障率は、横田ら ²¹⁾ における木造住宅(新築年)の全壊率に比例するとして、札幌市 ²³⁾ に記載される地震被害想定である震度6強における通信機能の支障率9.2%と横田ら ²¹⁾ による震度6強における木造住宅(新築年)の全壊率7.0%から求めた係数1.314(=9.2/7.0)を、各震度階級における木造住宅(新築)全壊の発生確率(「人・財産の被害」の発生確率)に乗じて、各震度階級における「通信機能の支障」の発生確率を算出した。
③	監視モニターの損傷	0.118	0.264	0.469	0.700	地震時における設備機器の転倒による損傷が主な被害であるとして、横田ら ²¹⁾ に記載される震災時における家具の移動・転倒率を適用した。
④	ヒューマンエラー 電話機の使用不能 不明確な被害状況の伝達 被害情報の紛失 防災無線の使用不能 電動操作のミス 手動操作のミス	0.025	0.056	0.100	0.149	震災時のパニック状態におけるヒューマンエラーの程度は、被害状況の視覚的な認識に影響されると考え、その各震度における発生確率は、横田ら ²¹⁾ における家具の移動・転倒率に比例するとして、パニック状態におけるヒューマンエラーの発生率10% ²⁴⁾ を震度6強におけるヒューマンエラーの発生率と設定して、横田ら ²¹⁾ における震度6強の家具の移動・転倒率46.9%から求めた係数0.213(=10.0/46.9)を、各震度階級における家具の移動・転倒率(「監視モニターの損傷」の発生確率)に乗じて、各震度階級における発生確率を算出した。
⑤	施設構造物の破損 地域の災害対策本部の立上げ遅延 手動設備の故障 取水ゲート駆体の損傷	0.000	0.000	0.020	0.100	地域の防災対策本部や取水ゲート設備は鉄筋コンクリート構造物であるとして、「構造物の損壊」の発生確率には、横田ら ²¹⁾ における鉄筋コンクリート構造物(1982年以降の建物・新築年)の全壊率を適用した。
⑥	設備機器の故障 観測機器の不具合 観測計器の誤表示 電動設備の故障 バックアップ電源の故障	0.059	0.132	0.244	0.400	地震による設備機器の故障率は、建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒による破損率より小さいとして、「設備機器の故障」の発生確率には、横田ら ²¹⁾ における鉄筋コンクリート構造物(新築年)の倒壊率と家具の移動・転倒率の平均値を適用した。
⑦	被害発見の困難	0.300	0.300	0.300	0.300	震災後の被害発見が困難となる主要な状況として、深夜における地震の発生が考えられる。深夜の時間帯を一日の30%として、震度階級によらず「被害発見の困難」の発生確率を0.3とした。
⑧	水位データの不足	0.200	0.200	0.200	0.200	豪雨時における施設管理者の経験から、「水位データの不足」の発生確率、すなわち、現状の水位データだけでは異常を察知できない場合の確率を震度階級によらず0.2と設定した。
⑨	道路に不通	0.000	0.000	0.030	0.150	東京都 ²²⁾ より、震災時における道路のリンク閉塞率より推定した。
⑩	系統電力の停電	0.000	0.013	0.180	0.900	東京都 ²²⁾ では、系統電力の停電率を建物の全壊率に比例する電柱折損率から求めている。そこで、系統電力の停電率は横田ら ²¹⁾ における木造住宅(新築年)の全壊率に比例するとして、札幌市 ²³⁾ に記載される地震被害想定である震度6強における停電率18%と横田ら ²¹⁾ による震度6強における木造住宅(新築年)の全壊率7.0%から求めた係数2.571(=18.0/7.0)を、各震度階級における木造住宅(新築年)全壊の発生確率(Table 4)における「人・財産の被害」の発生確率)に乗じて、各震度階級における「系統電力の停電」の発生確率を算出した。
⑪	手動操作の人員不足	0.200	0.400	0.600	0.800	解析対象施設の現地調査および施設管理者への聞き取り調査により、発生確率を推定した。

おける各基本事象の発生確率を示す。ただし、対象とする基本事象の正確な発生確率が既知である場合はほとんどない。そのため、限られた既知の発生確率から、対象とする基本事象にみあった発生確率を推定した。

4.1.5 頂上事象の発生確率

基本事象に与えた発生確率から、(2)式および(3)式を用いて頂上事象の発生確率を求めた。図-7に各震度階級における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を示す。震度階級の増加に伴い、取水ゲート

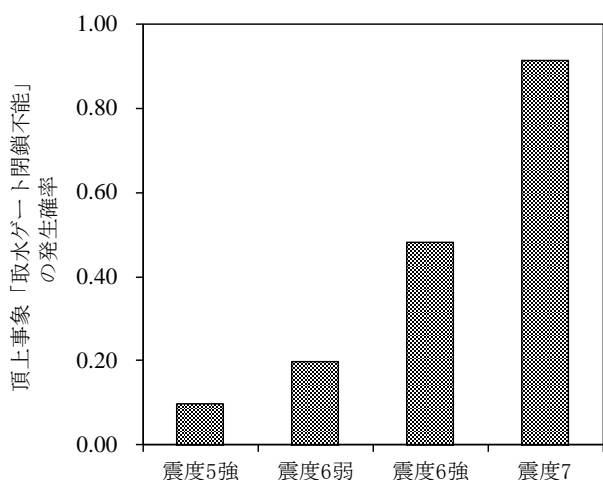


図-7 各震度階級における頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率

が閉鎖不能になる確率が急激に高まる。対策実施前の頂上事象の発生確率は、震度5強では0.10、震度6弱では0.20、震度6強では0.48、震度7では0.91となった。震度6弱以下の震災であれば、既存計画の災害対応は概ね支障なく遂行できる。しかし、震度6強を境に頂上事象の発生確率は0.5より大きくなり、計画どおりの災害対応の遂行が困難になる可能性が高い。すなわち、震度6強以上の大規模地震時には、用水路施設が被害を受けて二次災害が発生しても、それを阻止する災害対応もまた遂行不能となり、被害拡大を防ぐすべを失う。

4.1.6 確率重要度による評価

震度6強における確率重要度を(4)式に基づいて算出した。各基本事象の確率重要度を図-8に示す。確率重要度がもっとも高い基本事象は、「施設管理者の被災」および「取水ゲート施設の破損」である。しかし、現場の施設管理者による対策により、これらの基本事象の発生を低減することは非常に困難である。確率重要度が次に高い基本事象は、取水ゲートの「電動設備の故障」と「電動操作のミス」である。本施設では手動によるゲート操作も可能であるが、その作業には多大な労力を要することから、現状では「手動操作の不能」となる確率が高い。そのため、相対的に電動操作の重要度が高まったと考えられる。

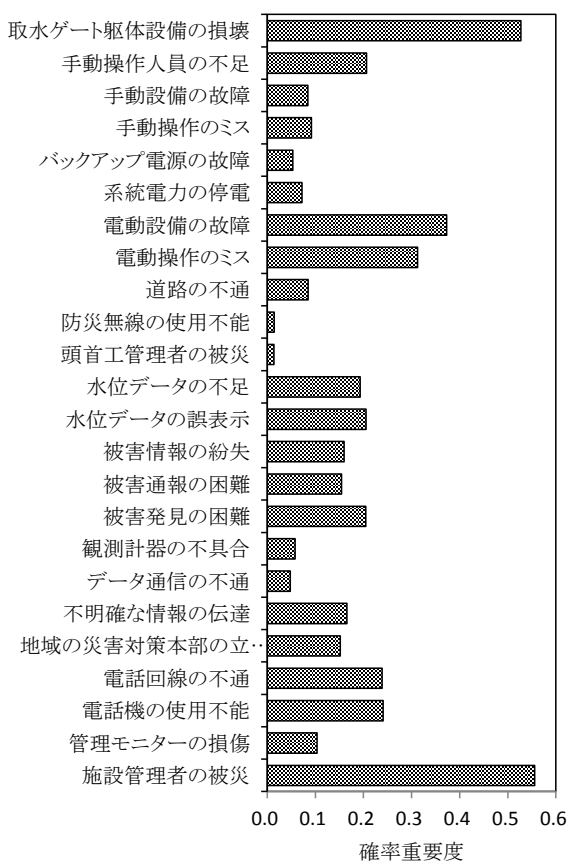


図-8 各基本事象の確率重要度

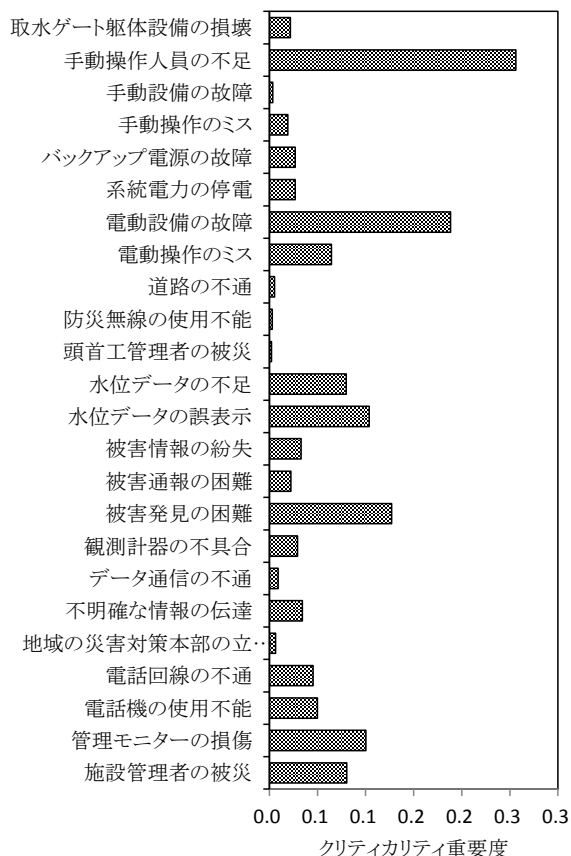


図-9 各基本事象のクリティカリティ重要度

4.1.7 クリティカリティ重要度による評価

震度6強における各基本事象のクリティカリティ重要度を(5)式に基づいて算出した結果を図-9に示す。確率重要度が最も高かった基本事象「施設管理者の被災」および「取水ゲート施設の破損」は、クリティカリティ重要度では大幅に減少した。このことは、両基本事象の発生確率はすでに小さく、さらにその発生確率を低減することは困難であることを反映している。クリティカリティ重要度では、頂上事象の発生確率を低減させるため、実際にどの基本事象に対して対策を行うことが効率のよい方法かを明らかにする。この場合、基本事象「手動操作人員の不足」および「電動設備の故障」のクリティカリティ重要度が際立って大きいことが示された。これらの基本事象に対する対策は、施設管理において実施可能な対策の範囲をこえるものの、その効果が大きいと評価されることから、対策実施に向けた検討が望まれる。

4.1.8 対策後における基本事象の発生確率の想定

以上の結果を踏まえて、本研究では、大規模地震対策として、①施設管理において実施可能な対策および②クリティカリティ重要度が高い基本事象「手動操作

人員の不足」および「電動設備の故障」に対する対策を行うものとした。ただし、対策の実施により基本事象の発生確率が必ずしもゼロになるわけではない。本研究では表-5に示すような対策実施後の基本事象の発生確率を想定した。

ヒューマンエラー対策により、震災時のパニック状態における施設管理者のミスが、通常時のヒューマンエラーの発生確率まで低減できたものとして、橋本²⁴⁾により、対策後のヒューマンエラーの発生確率は、対策前の発生確率の1/10であるとした。機器の破損や故

表-5 対策実施後における基本事象の発生確率

基本事象	基本事象に対する対策	対策実施後における基本事象の発生確率の想定
電話機の使用不能	施設管理において実施可能な対策	対策前における発生確率の1/10に減
監視モニターの損傷		
防災無線の使用不能		
電動操作のミス		
手動操作のミス	転倒防止対策 故障防止対策	対策前における発生確率の50%減
監視モニターの損傷		
観測計器の不具合		
水位データの誤表示	水位観測設備の増設	ゼロリスク(発生確率0)
水位データの不足		
手動操作人員の不足	地域行政からの応援	対策前における発生確率の50%減
電動設備の故障	設備機器の耐震強化	

障に関わる基本事象では、転倒防止の対策や震動に対する故障対策により、対策前における発生確率の50%が低減されると想定した。また、震災時における用水路内の水位は、豪雨時の実績や数値シミュレーションなどにより推定できることから、水位観測設備を適切に増設することにより水位データ不足は解消できるとして、その対策実施後はゼロリスク、すなわち発生確率を0とした。また、基本事象「手動操作人員の不足」および「電動設備の故障」に対する対策を施すことにより、その対策前における発生確率の50%が低減されると想定した。

4.1.9 対策後に想定される頂上事象の発生確率

基本事象に対する対策実施により想定される頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を図-10に示す。対策前後における比較のため、対策実施前の頂上事象の発生確率も併記した。

施設管理において実施可能な対策を施すことで、頂上事象の発生確率は、震度5強では0.02、震度6弱では0.08、震度6強では0.30、震度7では0.81となった。震度6弱以下の震災では、対策実施により災害対応を阻害する原因をほぼ解消することができ、既存計画の災害対応を確実に遂行することができる。しかし、震度6強においては同対策を実施しても頂上事象の発生確率は依然として0.3以上であり、さらに震度7においては対策の効果をほとんどみこめない。また、震度階級が小さいほど、その発生確率の低減効果が大きい。その理由は、震度6弱以下の震災では、施設構造物や社会インフラに関わる被害がほとんど起こらないため、施設管理における対策のみで主要な災害対応の阻害要因を解消することができるためである。逆に震度6強を境に急激に施設構造物や社会インフラの被害が増大することから、震度6強以上の震災では、施設管理における対策を実施しただけでは、頂上事象の発生確率を十分に低減することができない。

また、クリティカリティ重要度により挙げられた基本事象「手動操作人員の不足」および「電動設備の故障」に対する対策が実施できた場合、全体としてさらに頂上事象の発生確率を低減することができる。震度6強では頂上事象の発生確率が0.2以下となったが、震度7では依然として頂上事象の発生確率が約0.7に留まった。

4.1.10 事業継続計画の必要性

以上の結果から、震度7の最大地震動を受けた場合には、基本事象に対する適切な対策を実施しても既存の災害対応プロセスを完全に維持することは困難であ

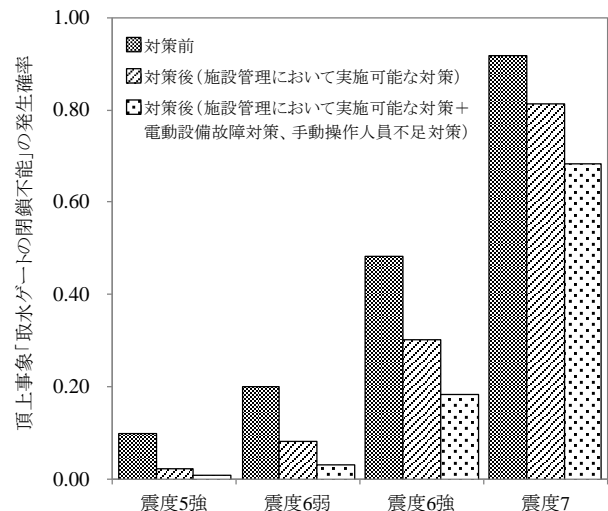


図-10 各震度階級における対策後の頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率

ることが分かった。このことは、被害発生を低減を図る防災計画には限界があり、そのため、被害が生じたとしても新たな手段をもって対応にあたる事業継続計画が必要であることを示唆する。すなわち、震度6強以上の震災が起きた場合、施設管理者は既存の災害対応が遂行不能になることを見据えて、事業継続計画に基づく災害対応に切り替えることも念頭において対応にあたる必要がある。

事業継続計画の策定では、第一に既存の災害対応計画における重要プロセスの代替手段を探索することになる。とくに、確率重要度は高いがその対策が困難な基本事象に関しては、現状のままリスクを保有せざるを得ないが、何らかの代替手段により基本事象発生時の対応を用意しておく必要がある。例えば、基本事象「施設管理者の被災」に対しては、従来の施設管理者のほか災害対応を的確に遂行できる複数の人員を養成することが考えられよう。ただし、こうした代替手段もまた被害を受ける可能性があるとともに、その導入には新たなコストと労力を必要とする。それゆえ、代替手段の効果を慎重に評価して、その導入を今後検討していくことが必要である。

4.2 ダムとパイプラインからなる用水路施設 (M パイプライン施設)

4.2.1 大規模地震時における災害過程と災害対応

(1) 施設管理の概要

M パイプライン施設の管理に必要な主要な設備は、図-11に示すように取水管ゲート、ファームポンド、緊急遮断弁、制水弁および水管理システムである。通常時、施設管理者は2名体制で、中央管理セン

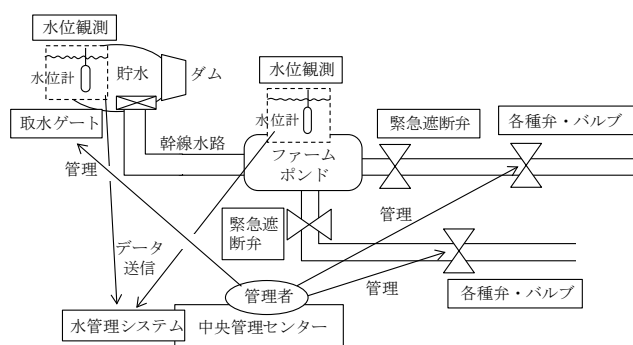


図-11 Mパイプライン施設の施設管理の概要

ターにおける水管理システムの監視モニターによりダムおよびファームポンドの水位を監視する。通常はとくに異常がない限り施設管理者が現地において作業を行うことはない。ただし、月に1~2回程度、施設管理者は水路沿線を巡回して各設備を目視点検する。なお、緊急遮断弁は各ファームポンド直下に設置されており、管体の破損事故による漏水発生時に、ファームポンドや管内の貯留水の流出を防止するための設備である。Mパイプライン施設に設置されている緊急遮断弁では、管内に設置されたセンサーにより、日常管理において想定される最大流速をこえる異常な流速を感知した場合に、自動的に弁体が動作して流水を遮断するしくみとなっている。

(2) 災害過程

Mパイプライン施設が被災した場合に想定される災害過程のモードを図-12に示す。地震動により管体や附帯設備が破損すれば、そこから多量の水が流出することになる。パイプラインは高水圧であるため、管体の破損箇所から多量の水が爆発的に噴出することも考えられる。このような事態が地域の住宅地や主要道路の近傍において生じたとすれば、その社会的損害は大きい。

(3) 災害対応

施設管理者は、パイプラインとダムの管理を行っている。とくに、大規模地震発生時には、ダムの安全性確認が施設管理者の最優先の管理行動となる。図-13に大規模地震発生直後のMパイプライン施設の災害対応の流れを示す。震度4以上の地震が発生すれば、施設管理者は災害対応の体制を確立する(工程①)。この時点で施設管理者はダムサイトの安全性確認へ急行しなければならない。それゆえ、パイプライン施設の管理では、人員の不足が懸念される。次に、パイプライン施設における被害の有無を把握するため、施設管理者は水管理システムにおける水位データを確認す

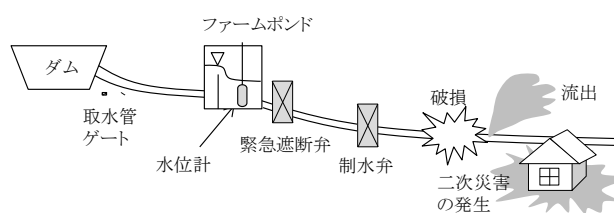


図-12 大規模地震時に想定される災害過程

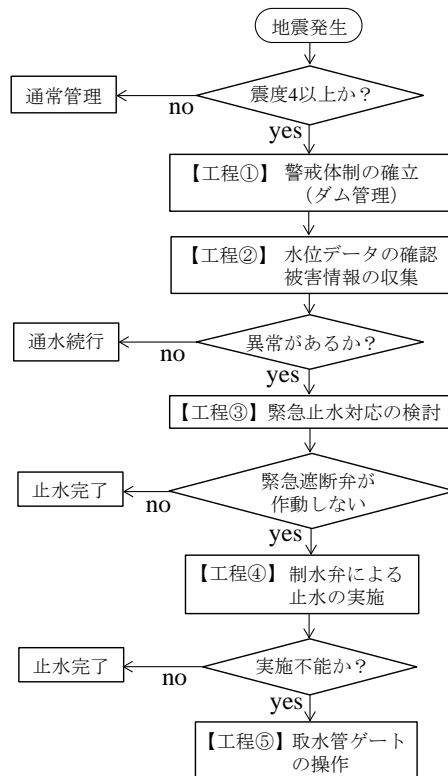


図-13 大規模地震発生直後の災害対応の流れ

る(工程②)。各ファームポンドには水位計が設置されており、その水位データに異常が認められれば、施設管理者は直ちに緊急遮断弁が作動したかどうかを確認する(工程③)。緊急遮断弁により適切に止水されていれば、被害箇所からの流出による二次災害を最小限に低減することができる。しかし、緊急遮断弁が作動していないとなれば、施設管理者が現地へ急行して、制水弁操作により通水を停止しなければならない(工程④)。さらに制水弁による止水が実施不能な状況となった場合、ダム管理所へ連絡して、ダム直下にあるパイプラインの取水ゲートの操作による止水を依頼する。連絡を受けたダム管理所の施設管理者は、取水ゲートの操作を実施する(工程⑤)。

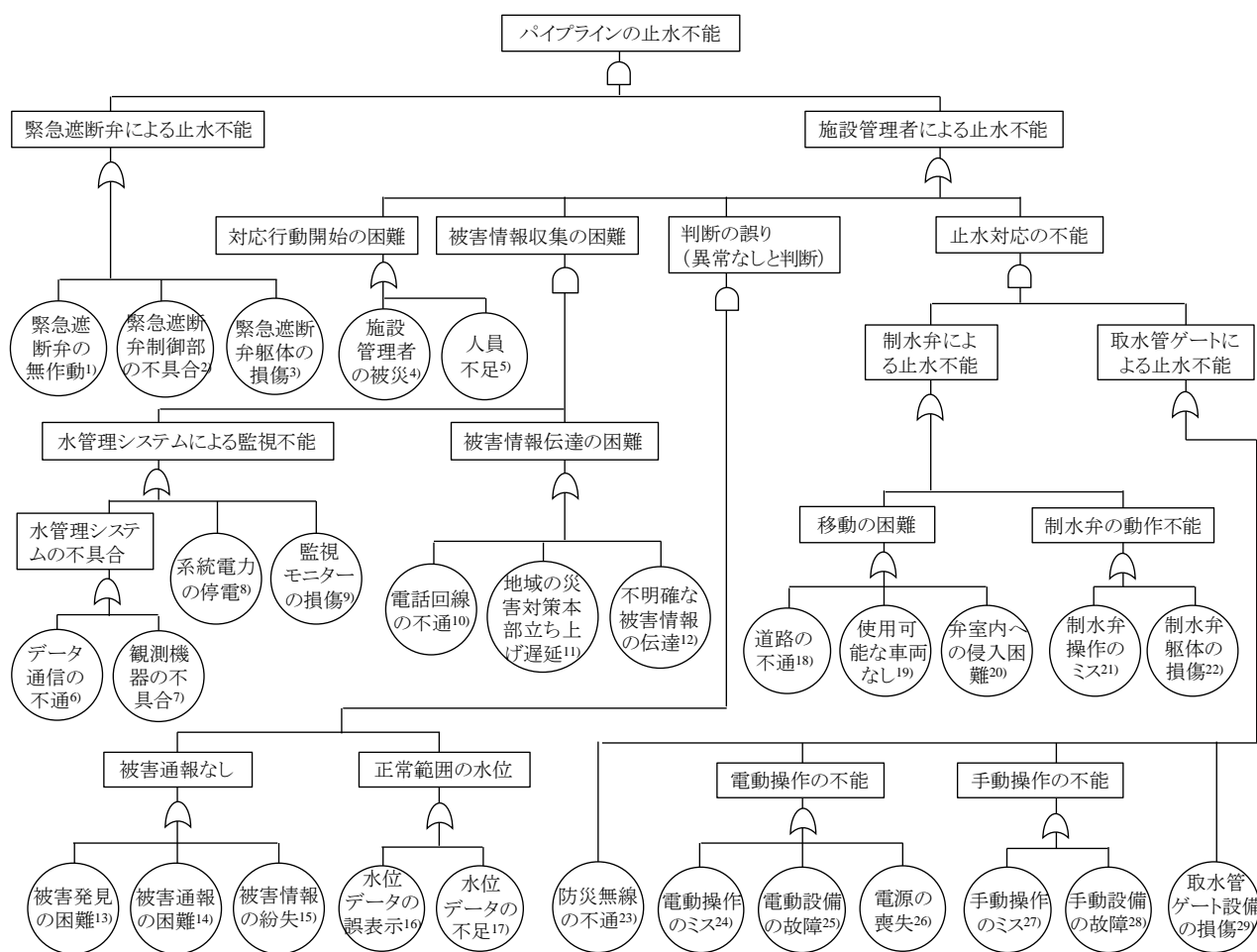
以上の災害対応が計画どおり遂行できれば、震災時においてパイプライン施設の被害に起因する二次災害の拡大を迅速に防止することができる。

4.2.2 FTAによる基本事象の特定

大規模地震災害によりパイプライン施設が被災した場合、第一に被害箇所からの流出を止水して、二次災害の拡大を防止しなければならない。そこで本研究では、被害を受けたパイプラインからの流出を止水できない状況、すなわち、「パイプラインの止水不能」をFTA図の頂上事象として設定した。図-14に頂上事象を「パイプラインの止水不能」とするFTA図を示す。Mパイプライン施設における止水手段としては、緊急遮断弁による自動止水とその緊急遮断弁が適切に作動しなかった場合の施設管理者の対応行動による止水がある。それゆえ、頂上事象が起こる第一の原因となる中

間事象を「緊急遮断弁による止水不能」および「施設管理者による止水不能」とした。これらの中間事象の両方が発生したとき頂上事象が起こることから、ANDゲートを用いて頂上事象と結合した。以上の各中間事象についてFTA図を展開し、その発生原因となる基本事象の特定を行った。

緊急遮断弁はパイプラインの漏水事故に対応するために設置されたもので、必ずしも地震時に対応しているわけではない。それゆえ、地震時におけるその機能の信頼性が十分に確保されているとは限らない。そこで、緊急遮断弁が作動しない状況や、震動により緊急遮断弁制御部に不具合が生じること、緊急遮断弁自体



¹⁾緊急遮断弁が作動を開始するトリガーの設定値の不適正などによる無作動、²⁾震動による緊急遮断弁の流量センサーなど制御機能の不具合。
³⁾震動による緊急遮断弁の躯体自体の変形や損傷。⁴⁾施設管理者自身およびその家族や近親者、あるいは自宅など重要財産の被災。⁵⁾ダム管理に多くの人員が割かれるため、パイプライン管理の人員が不足。⁶⁾各水位観測機器からのデータの通信不能、⁷⁾観測機器の不具合による水位確認不能。⁸⁾通常時の電源である系統電力の停電。⁹⁾事務所内の水位データ監視モニターの転倒などによる損傷。¹⁰⁾固定電話および携帯電話の不通。
¹¹⁾被害通報は地域の災害対策本部を経由して施設管理者に届くと想定し、災害対策本部の立ち上げ遅延による被害報伝達の遅延。¹²⁾施設管理者が被害通報を受けても内容が不明確である状況。¹³⁾夜間や人が少ない場所における被害発生。¹⁴⁾被害発見者が被災している状況で通報が困難。¹⁵⁾震災時の混乱による情報伝達過程における被害情報の紛失。¹⁶⁾水位観測機器が誤表示をしているにも関わらず、施設管理者はそれを正常値と認識している状況。¹⁷⁾被災による急激な水位変化を捉えるためには、水位観測地点数が不足している状況。¹⁸⁾施設管理者が制水弁へ急行する場合の道路の不通。¹⁹⁾災害対応に必要な車両の不足、²⁰⁾制水弁位置の不明や低酸素による弁室内への侵入困難。²¹⁾制水弁の操作ミス。²²⁾制水弁の躯体自体の変形や損傷。²³⁾ダム管理者や意志決定者との連絡手段となる防災無線の使用不能、²⁴⁾取水管ゲートの電動操作ミス。²⁵⁾地震動による電動設備の故障。²⁶⁾バックアップ電源の故障。²⁷⁾取水管ゲートの手動操作ミス。²⁸⁾地震動による手動設備の故障。²⁹⁾取水管ゲートの躯体自体の変形や損傷。

図-14 「パイプラインの止水不能」を頂上事象とするFTA図

が地震動により変形・破損して、動作不能となる場合が中間事象「緊急遮断弁の止水不能」の発現原因として考えられた。

緊急遮断弁により適切に止水が行われなかった場合、施設管理者の対応によりが止水しなければならない。施設管理者はまず管理体制を確立して、被害情報を収集する。万一被害が生じていれば、制水弁を閉鎖、場合によってはダム直下の取水管ゲートを閉鎖して止水を行う。その各工程の遂行が阻害されるとき、中間事象「施設管理者による止水不能」が起こる。それゆえ、「施設管理者による止水不能」を引き起こす中間事象として、「対応行動開始の困難」、「被害情報収集の困難」、「判断の誤り（異常なしと判断）」、「止水対応の不能」が挙げられた。

大規模地震時には、施設管理者自身が被災して対応不能となる場合とともに、ダム管理に主要な人員が割かれるため、パイプライン施設の対応を行う人員が不足することが考えられる。そのため、「対応行動開始の困難」に対する基本事象として「施設管理者の被災」および「人員不足」が挙げられた。

施設管理者における被害情報の収集手段は、水管理システムにおけるファームポンドの水位観測、または外部からの被害通報の受信である。そのため、水管理システムの不具合や被害通報の送受信に関わるトラブルなどの基本事象が、中間事象「被害情報収集の困難」の原因として特定された。

「判断の誤り（異常なしと判断）」は、パイプラインにおいて実際に被害が発生しているにも関わらず、「異常なし」と判断してしまうことである。施設管理者は「被害通報なし」かつ水管理システムにおいて「正常範囲の水位」を確認した場合に「異常なし」と判断する。このような現実と情報の不整合が生じる基本事象として、現状の水位観測地点数では被害箇所における水位の異常を十分に捉えられない可能性があることや被害情報の発信および情報伝達過程におけるトラブルなどが考えられた。

施設管理者による止水手段には、被害路線上流に位置する制水弁操作による止水とダム直下の取水管ゲート閉鎖によるパイプライン全路線の止水がある。制水弁は手動による機側操作となることから、「制水弁による止水不能」が生じる原因として、施設管理者の現地への到達を困難にする基本事象や制水弁自体が動作不能となる基本事象が挙げられた。また、取水管ゲートは電動により動作するが、手動による操作も可能である。それらの設備機器の操作ミスや故障などのリス

クが基本事象として特定された。

以上のように、FT 図を作成することにより、頂上事象から中間事象の連鎖を通じて、基本事象を特定した。

4.2.3 基本事象に対する対策

(1) 対策の分類

FT 図を作成することにより特定した各基本事象に対する対策を表-6に示す。本研究では、実現性が高い対策として、第一に施設管理において実施可能な対策を抽出した。さらにそれ以外の対策を、地域住民および行政機関との連携が必要な対策と施設構造物や社会インフラの耐震強化対策にそれぞれ分けて整理した。

(2) 施設管理において実施可能な対策

防災無線が使用不能になる状況や機械設備の操作ミスは、震災時のパニック状態における施設管理者のヒューマンエラーにより生じると考えられる。そのため対策として、震災時のパニック状態においてもミスが生じにくいシステムの構築が必要である。水位観測

表-6 基本事象に対する対策

基本事象	対策	対策の枠組
防災無線の使用不能		
制水弁操作のミス	ヒューマンエラー対策	
電動操作のミス		
手動操作のミス		
監視モニターの損傷	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	震動による故障対策	
水位データの誤表示		
水位データの不足	水位観測設備の増設	
弁室内への侵入困難	現地の点検・確認	
緊急遮断弁の無作動		
地域の災害対策本部立ち上げの遅延	地域行政の危機管理対策の強化	地域住民および行政機関との連携が必要な対策
被害情報の紛失		
不明確な被害情報の伝達	地域住民との災害対応計画の策定	
被害発見の困難		
人員の不足	地域行政に協力要請	
使用可能な車両なし		
施設管理者の被災	住宅など建物の耐震化	
被害通報の困難		
電話回線の不通	情報通信機能の強化	
データ通信の不通		
道路の不通	道路施設の耐震強化	
電動設備の故障	設備機器の耐震強化	施設構造物や社会インフラの耐震強化に関わる対策
緊急遮断弁制御部の不具合		
電源の喪失		
手動設備の故障		
系統電力の停電	電力システムの耐震強化	
緊急遮断弁駆体の損傷	施設構造物の耐震化	
制水弁駆体の損傷		
取水管ゲート駆体の損傷		

機器などの故障リスク対しては、地震動に対する転倒防止や固定化などの対策を施すことのほか、振動を受けた場合や異常水位となった場合における観測計器の誤作動の有無や動作特性を事前に確認しておくことが重要である。また、現状の水位観測地点におけるデータだけでは、発災時における水路の異常を速やかに捉えることができない可能性がある。この対策として、現地調査やシミュレーションにより適切な水位観測地点を推定して、観測設備の増強を検討する必要がある。有事において緊急遮断弁が動作しない第一の原因として、適正な動作開始のトリガー設定値が未確定ということが挙げられる。現地調査や過去のデータから現状のトリガー設定値を再検討する必要がある。

以上の対策実施には、コスト負担と施設管理者の労役を要するものの、施設管理の枠組みの中において実施可能であると考えられる。

(3) 地域住民および行政機関との連携が必要な対策

長大なパイプライン施設における被害の第一発見者の多くは地域住民である。その被害情報は地域の災害対策本部を通じて、施設管理者に到達するものと考えられる。それゆえ、施設管理者への被害情報の到達を確実なものにするためには、地域住民の協力体制の確立や行政機関の危機管理対策の強化が必要である。また、Mパイプライン施設の場合、大規模地震時にはダム管理に人員が割かれることから、パイプラインの対

応にあたる人員が不足することが懸念される。地域防災計画を見直す中で、震災時の適切な人員配置が計画されることが望まれる。

(4) 施設構造物や社会インフラの耐震強化対策

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を低減する対策は、基本的に耐震強化対策である。これには社会全体の強靱化が必要であり、施設管理者が単独で、その耐震強化対策を直接実施できるものではない。

4.2.4 基本事象の発生確率の設定

各震度階級における頂上事象「パイプラインの止水不能」の発生確率を算出するため、各基本事象の発生確率を設定した。表-7に震度5強、震度6弱、震度6強、震度7の震災時における各基本事象の発生確率を示す。ただし、対象とする基本事象の正確な発生確率が既知である場合はほとんどない。そのため、限られた既知の発生確率から、表-4を参照して、S開水路施設の場合と同様に、対象とする基本事象にみあった発生確率を設定した。

4.2.5 頂上事象の発生確率

基本事象に与えた発生確率から、(2)式および(3)式を用いて、頂上事象の発生確率を求めた。各震度階級における頂上事象「パイプラインの止水不能」の発生確率を図-15に示す。「緊急遮断弁あり」の状況、すなわち緊急遮断弁を備えた現状の場合と「緊急遮断

表-7 基本事象の発生確率

番号	基本事象	基本事象の発生確率				基本事象の発生確率の推定根拠
		震度5強	震度6弱	震度6強	震度7	
①	人・財産の被害 管理者の被災 被害通報の困難 頭首工管理者の被災	0.000	0.005	0.070	0.350	表-4 ①に記した推定根拠と同じ
②	連絡・通信の遮断 電話回線の不通 データ通信の不通	0.000	0.007	0.092	0.460	表-4 ②に記した推定根拠と同じ
③	監視モニターの損傷	0.118	0.264	0.469	0.700	表-4 ③に記した推定根拠と同じ
④	ヒューマンエラー 防災無線の使用不能 制水弁操作のミス 不明確な被害状況の伝達 被害情報の紛失 電動操作のミス 手動操作のミス	0.025	0.056	0.100	0.149	表-4 ④に記した推定根拠と同じ
⑤	施設構造物の破損 緊急遮断弁駆体の損傷 地域の災害対策本部の立上げ遅延 手動設備の故障 制水弁駆体の損傷 取水管ゲート駆体の損傷 使用可能な車両なし	0.000	0.000	0.020	0.100	表-4 ⑤に記した推定根拠と同じ
⑥	設備機器の故障 観測機器の不具合 水位データの誤表示 緊急遮断弁制御部の不具合 電動設備の故障 電源の喪失	0.059	0.132	0.244	0.400	表-4 ⑥に記した推定根拠と同じ
⑦	被害発見の困難 弁室内への侵入困難	0.300	0.300	0.300	0.300	表-4 ⑦に記した推定根拠と同じ
⑧	緊急遮断弁の無作動	0.200	0.200	0.200	0.200	過去に緊急遮断弁の未作動や誤作動の事例が発生しており、現状では信頼性が十分であるとはいえない。施設管理者からの聞き取りを踏まえて発生確率を設定した。
⑨	水位データの不足	0.100	0.100	0.100	0.100	通常の管理ではデータが不足することはないが、被害時における急速な水位変化を捉える事ができるか、不測の事態が考えられる。現地調査および施設管理者への聞き取りにより、発生確率を推定した。
⑩	道路に不通	0.000	0.000	0.030	0.150	表-4 ⑧に記した推定根拠と同じ
⑪	系統電力の停電	0.000	0.013	0.180	0.900	表-4 ⑨に記した推定根拠と同じ
⑫	人員不足	0.200	0.400	0.600	0.800	震度4以上の地震時には、ダムの安全性点検が優先されて、パイプラインの対応にあたる施設管理者が不足する。施設管理者から聞き取った現状から、発生確率を推定した。

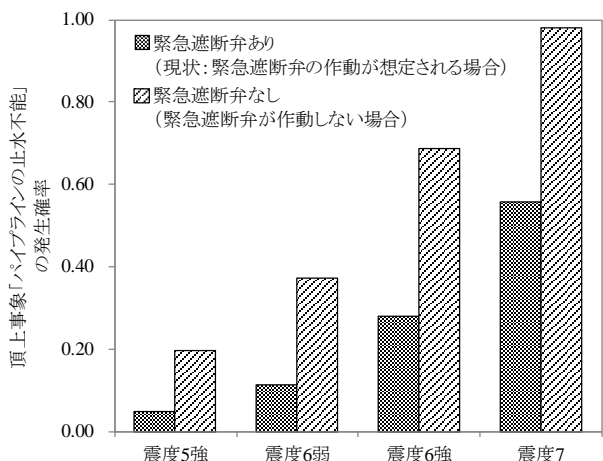


図-15 各震度階級における頂上事象「パイプラインの止水不能」の発生確率

弁なし」の状況、すなわち緊急遮断弁が作動せず、施設管理者自らの対応行動により止水しなければならない場合で、頂上事象の発生確率が大きく異なることから、ここでは両者の場合を記した。

「緊急遮断弁あり」の場合では、最大級の震度7においても頂上事象の発生確率が0.55となった。しかし、ひとたび緊急遮断弁が作動しない「緊急遮断弁なし」の場合となれば、頂上事象の発生確率はその2倍相当となり、震度6強以上の状況下では、ほぼ確実に災害対応の遂行は阻害されるものと考えられる。このことは、緊急遮断弁の導入効果が非常に高いことを示すと同時に、緊急遮断弁に依存した管理体制の危うさを示唆する。

そこで、後述の対策効果の評価では、「緊急遮断弁あり」の場合と「緊急遮断弁なし」の場合（施設管理者の対応行動のみによる止水）のそれぞれについて検討した。

4.2.6 確率重要度による評価

震度6強における確率重要度を(3)式に基づいて算出した。各基本事象の確率重要度を図-16に示す。第一に確率重要度が高い基本事象は「緊急遮断弁躯体の損傷」や「制水弁躯体の損傷」、「取水管ゲート躯体の損傷」などの設備自体の損傷であった。この結果は、最終的に設備が損傷して動作しなければ、為すすべもなく止水は不可能になるという事実と合致する。また、このほか「使用可能な車両なし」などの施設管理者の移動を妨げる事象や「地域の災害対策本部の立ち上げ遅延」の重要度が比較的大きいことが示唆された。

4.2.7 クリティカリティ重要度による評価

各基本事象のクリティカリティ需要度を図-17に示す。図-16において確率重要度が高かった基本事象が、

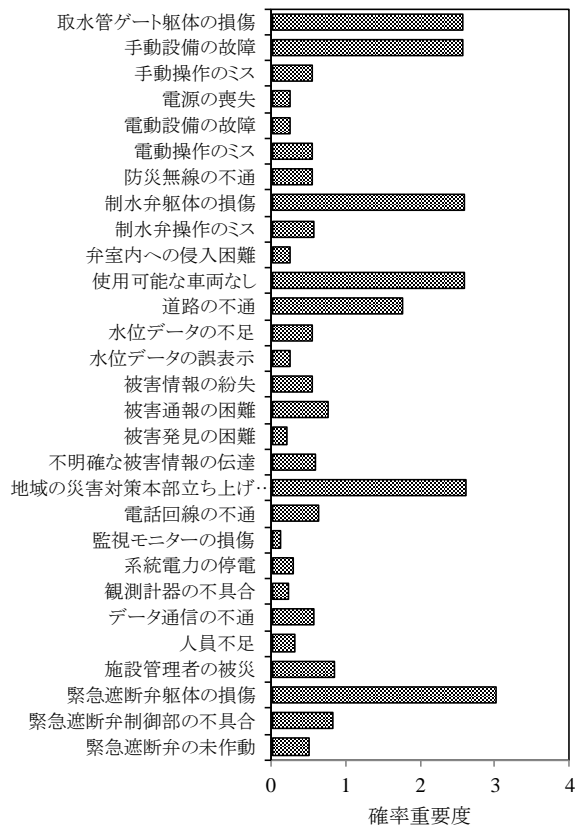


図-16 各基本事象の確率重要度

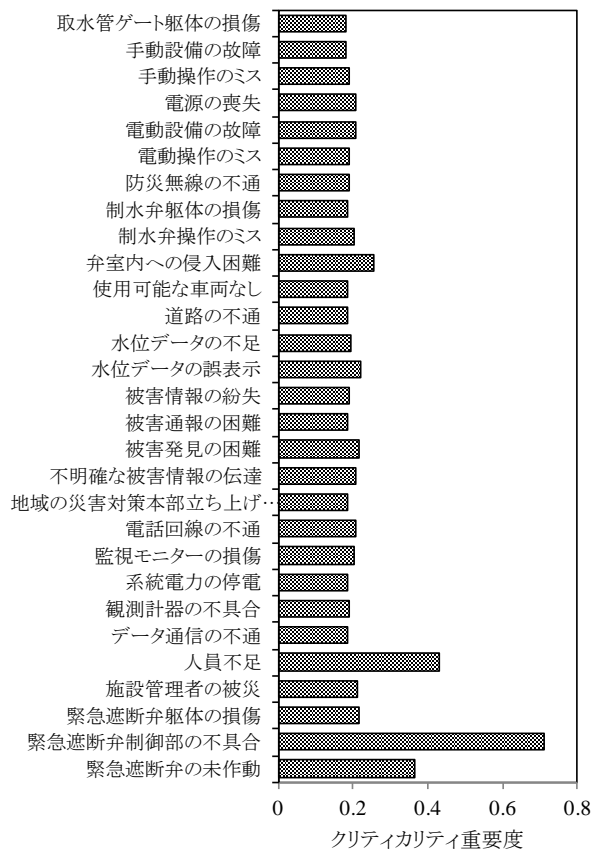


図-17 各基本事象のクリティカリティ重要度

表-8 対策実施後における基本事象の発生確率

基本事象	基本事象に対する対策	対策実施後における基本事象の発生確率の想定
監視モニターの損傷	転倒防止対策 故障防止対策	対策前における発生確率の50%減
観測計器の不具合		
水位データの誤表示		
弁室内への侵入困難	現地の点検・確認	対策前における発生確率の1/10に減
緊急遮断弁の無作動		
防災無線の使用不能		
制水弁操作のミス	ヒューマンエラー対策	ゼロリスク(発生確率0)
電動操作のミス		
手動操作のミス		
水位データの不足	水位観測設備の増設	ゼロリスク(発生確率0)
人員不足	地域行政に協力要請	対策前における発生確率の50%減
緊急遮断弁制御部の不具合	震動による故障の対策	

クリティカリティ重要度では大幅に減少した。このことは、設備躯体の損傷などによる影響は大きい、その発生確率は小さく、対策によりさらに発生確率を低減することは困難であることを意味する。一方、基本事象「緊急遮断弁制御部の不具合」は、クリティカリティ重要度をもっとも高く、対策の実施による効果的な発生確率の低減が期待できる。そのほか、「人員不足」が際立った。Mパイプライン施設では、大規模地震時には主要な施設管理者がダムサイトにおける安全確認に割かれることから、現状では人員不足になる可能性が高い。緊急遮断弁が作動せず、施設管理者の対応行動により止水を完了しなければならないとき、施設を熟知した人員の不足は致命的である。地域全体の防災計画の見直しを図る中で、人員不足を解消する施策が望まれる。

4.2.8 対策後における基本事象の発生確率の想定

本研究では、現実的な大規模地震対策として、表-6に分類した「施設管理において実施可能な対策」の実施を想定した。また、コストや労力の面から直ちに対策を実施できないが、クリティカリティ重要度が高い基本事象である「緊急遮断弁制御部の不具合」および「人員不足」に対する対策を行うものと想定した。

以上の対策実施により想定される基本事象の発生確率の低減率を表-8に示す。「施設管理において実施可能な対策」による発生確率の低減は、S開水路施設の評価において想定した表-5に準じた。基本事象「緊急遮断弁制御部の不具合」および「人員不足」に対する対策については、それぞれ「対策前における発生確率の50%減」と想定した。

4.2.9 対策後の頂上事象の発生確率

基本事象に対する対策実施後の各震度階級における頂上事象「パイプラインの止水不能」の発生確率を、「緊急遮断弁あり」の現状の場合と「緊急遮断弁なし」とする施設管理者の対応行動のみの場合について、そ

れぞれ図-18および図-19に示す。対策前後における比較のため、図-15に示した対策前の頂上事象の発生確率もそれぞれ併記した。

「緊急遮断弁あり」の場合(図-18)において、「施設管理において実施可能な対策」の効果は大きくないが、クリティカリティ重要度の評価により挙げられた「緊急遮断弁制御部の不具合」および「人員不足」に対する対策が適切に講じられたとすれば、震度7の最大地震動時においても頂上事象の発生確率を約0.25に抑制できることが示された。

「緊急遮断弁なし」の場合(図-19)では、震度6強以下の地震動において、「施設管理において実施可能な対策」および「人員不足対策」を実施することにより、頂上事象の発生確率を有効に低減することがで

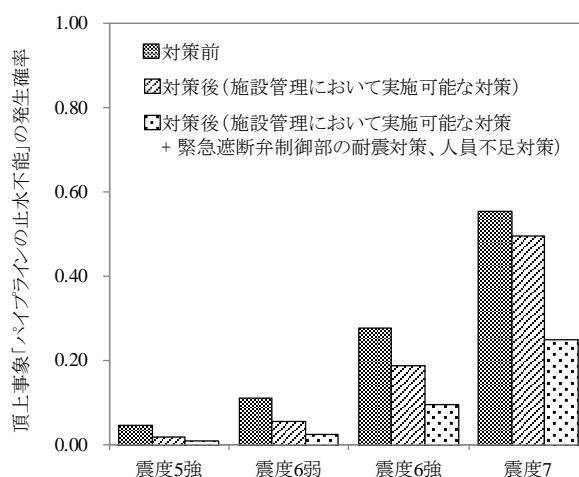


図-18 各震度階級における頂上事象「パイプラインの止水不能」の発生確率(緊急遮断弁あり)

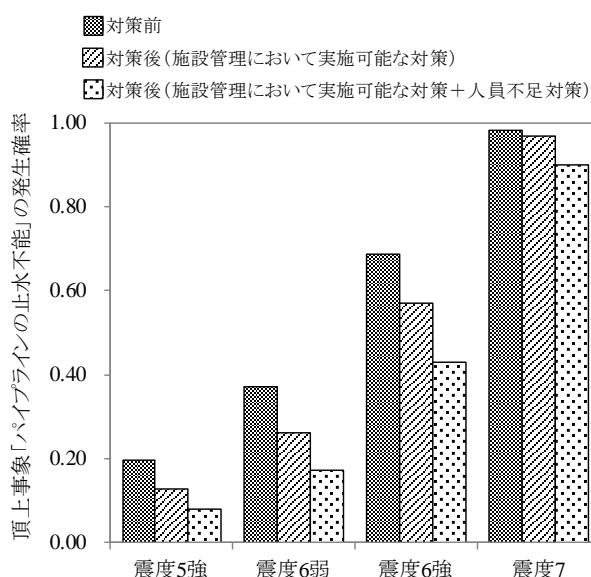


図-19 各震度階級における頂上事象「パイプラインの止水不能」の発生確率(緊急遮断弁なし)

きるが、依然として震度 6 強における頂上事象の発生確率は 0.4 以上であり、震度 7 においてはほとんど対策の効果が見込めない。この場合、震度 6 強から震度 7 の最大級の大規模地震時には、既存の災害対応プロセスを完全に維持することは困難であることが分かった。

4. 2. 10 事業継続計画の必要性

図-18 の結果をみれば、緊急遮断弁を備えた現状の施設管理のままで、大規模地震に概ね対応しているといえる。この結果を肯定的に捉えれば、緊急遮断弁などの自動システムの導入は非常に有効性が高い手段であると評価できる。しかし、緊急遮断弁が作動しなくなった時点で、図-19 に示したように災害対応を遂行するハードルが急激に高くなるのは、現実の災害対応計画として適切であるとはいえない。事業継続計画の観点から現状の管理をみなおすと、緊急遮断弁が作動しなくても確実に災害対応が遂行されるように計画されるべきである。すなわち、「緊急遮断弁なし」の場合における災害対応力の強化を図る必要がある。

5. おわりに

本研究では、FTA を用いて、大流量の開水路施設と高圧のパイプライン施設を対象に、それぞれの災害対応計画における大規模地震対策を検討するとともに、その対策効果を評価した。その結果、震度 6 強以下の震災時では、施設管理において実施可能な対策による一定の効果が期待できるが、震度 7 の最大級の地震動においては、同様な対策を講じても十分な効果が見込めないことが示された。このことから、既存の災害対応の遂行に支障が生じた場合に備えた事業継続計画の必要性が示唆された。

また、M パイプライン施設では、緊急遮断弁が装備されていることから、震度 7 の地震動であっても「パイプラインの止水不能」となる確率が約 0.55 であった。このことは、S 開水路施設においても、水位の異常を捉えて取水ゲートを自動的に閉鎖するシステムなどを導入することで、「取水ゲートの閉鎖不能」となる確率を大幅に低減できることを示唆する。しかし、震度 6 強から震度 7 の地震動において、ひとたび緊急遮断弁が作動しなくなれば、施設管理者による災害対応行動はほぼ確実に遂行不能になることも示された。こうした観点からも事業継続計画による災害対応のみなおしが必要である。

参考文献

- 1) 森丈久、森充広、渡嘉敷勝、中矢哲郎：大規模地震による農業用水路の被害実態に基づく耐震性評価に関する考察、農業農村工学会誌、76(1)、pp.3-7、2008.
- 2) 有吉充、毛利栄征：平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震による農業集落排水施設の被害、農工研技報 280、pp.103-110、2008.
- 3) 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.
- 4) 石井一郎、丸山暉彦、元田良孝、亀野辰三、若海宗承：防災工学 第 2 版、森北出版株式会社、pp.12-34、2005.
- 5) 土木学会：構造物の耐震基準等に関する提言、<http://www.jsoc.or.jp/committee/earth/>、1995.
- 6) 農林水産省、農業農村工学会：土地改良施設 耐震設計の手引き、pp.1-5、2003.
- 7) 社団法人日本技術士会：減災と技術 一災害の教訓を活かす一、社団法人日本技術士会、pp.81-82、2005.
- 8) 総務省：地方公共団体における ICT 部門の業務継続計画（BCP）策定に関するガイドライン、pp.1-3、2008.
- 9) 土木学会：地域防災計画特定テーマ委員会成果の概要、pp.3-5、2013.
- 10) 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 一幹線用水路施設を対象としたリスクマネジメント一、農業農村工学会論文集、290、pp.33-42、2014.
- 11) 総務省：地方公共団体における ICT 部門の業務継続計画（BCP）策定に関するガイドライン、pp.5-7、2008.
- 12) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：下水道 BCP 策定マニュアル～第 2 版～（地震・津波編）、pp.2-3、2012.
- 13) 内閣府防災担当：事業継続ガイドライン 一あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応一、2013.
- 14) 静岡県交通基盤部農地局：静岡県土地改良施設維持管理事業継続計画モデルプラン、2012.
- 15) 徳島県：徳島県土地改良区 BCP マニュアル、2013.
- 16) 昆 正和：実践 BCP 策定マニュアル第 2 版、オーム社、pp.28-29、2012.
- 17) 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.
- 18) 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.58-65、2013.
- 19) 塩見 弘、島岡 淳、石山敬幸（2005）：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.33-37、2005.

- 20) 気象庁 (参照 2014.12.5) : 気象庁震度階級の解説、(オンライン)、入手先<<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/kaisetsu/html>>、2009.
- 21) 横田 崇、川上徹人、尾崎友亮、下山利浩、近藤さや、岡部 来、吉田知央、坂本誠一、能勢 努、辻村晃一、下坪善浩: 震度に関する検討について、験震時報、75、61-105、2011.
- 22) 東京都 (参照 2014.12.5) : 首都直下地震等による東京の被害想定、第3部被害想定手法、(オンライン)、入手先<<http://www.busai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>>、2012.
- 23) 札幌市 (参照 2014.12.5) : 第3次地震被害想定、第3次地震被害想定について(想定結果、要点):(オンライン)、入手先<http://www.city.sapporo.jp/kikikanri/daisannjijisinnhigaisoutei/daisannjijisinnhigaisoutei_index.html>、2014.
- 24) 橋本邦衛: 安全人間工学、中央労働災害防止協会、93-95、2009.

DEVELOPMENT OF MANAGEMENT TECHNIQUES FOR A LARGE-SCALE AGRICULTURAL IRRIGATION SYSTEM IN EMERGENCY SITUATIONS SUCH AS EARTHQUAKES

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Cold-Region Agricultural Development Research Group
(Irrigation and Drainage Facilities) and Director for

Author : NAKAMURA Kazumasa, OHKUBO Takashi
HOMMURA Yukio

Abstract : Large-scale earthquake disasters, such as the Great East Japan Earthquake of 2011, have damaged many agricultural irrigation facilities. As a precaution against large-scale earthquakes, it is urgently necessary to strengthen the disaster response capabilities of key agricultural irrigation facilities. In view of this, research has been implemented for the purpose of developing a control system that provides for large-scale earthquakes and other emergencies, and with the aim of proposing an emergency management framework. In our FY2014 research, the results of Fault Tree Analysis (FTA) concerning high-flow open channels in paddy fields and high-pressure pipeline facilities in upland farms gave a full picture of the factors that interfere with disaster responses during large-scale earthquakes. The effectiveness of remedial measures was also analyzed and evaluated. The analysis results regarding open channels found that it is not very difficult to take the disaster responses that are currently planned when the seismic intensity is up to “6 lower” on the Japanese seismic intensity scale. In the event of an earthquake with an intensity of “6 upper”, it becomes more difficult to make these responses. For an earthquake with an intensity of “7”, it is not possible to greatly decrease the probability that facility managers will be unable to take disaster responses even when they can take other measures for facility management. These analysis results indicate the necessity of a business continuity plan (BCP) for open channels with the aim of providing for an emergency when the implementation of existing disaster response plans is disrupted. The analysis results for pipeline facilities show that the implementation of disaster responses is disrupted with a probability of less than 0.5 in an earthquake having an intensity of “7”. The low probability, however, owes a great deal to automatic operation of emergency shutoff valves. This suggests that disaster responses by facility managers are likely to be disrupted when an earthquake with an intensity of “6 upper” or greater takes place and emergency shutoff valves do not function properly. Thus, a BCP is also necessary for pipeline facilities.

Keywords : large-scale earthquake, open channel, pipeline, disaster response, FTA