

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、立石信次

【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、農業水利施設の管理システムおよび管理体制における大規模地震対策の提案を目的として、北海道内における典型的な大規模開水路施設と高圧パイプライン施設を対象に、信頼性解析手法のひとつである FTA を用いて、大規模地震時における施設管理者の災害対応行動を阻害する原因を特定するとともに、その原因に対する対策の効果を評価した。その結果、次の主な成果が得られた。

- (1) 大規模開水路の施設管理者は、地震時における万一の施設被災による二次災害の発生を防止するため、発災後ただちに取水ゲートを閉鎖することが必要であると考えている。この施設管理者による災害対応行動を阻害する 24 の原因事象が特定され、そのうち 11 事象に対して、施設管理現場における対策が実施可能であると考えられた。その対策を講じることにより、震度 6 強以下の震災であれば、取水ゲートをおおむね支障なく閉鎖できることが分かった。しかし、震度 7 の震災となれば、同対策を講じるのみでは、取水ゲートを閉鎖することは困難であることが示された。この結果から、対策の実施が有意義であることを確認した。また一方で、取水ゲートが閉鎖不能となった場合に備えた代替手段の必要性が示唆された。
- (2) パイプライン施設で地震時における施設被災に伴い漏水が生じたときには、施設管理者は緊急遮断弁が作動して通水が停止することを期待している。しかし、緊急遮断弁が作動しなければ、直ちに施設管理者は通水停止の災害対応を実施しなければならない。こうした震災時の災害対応を阻害する 28 の原因事象が特定され、そのうち 12 事象に対して、施設管理現場における対策が実施可能であると考えられた。その対策を講じれば、緊急遮断弁が作動しない場合でも、震度 6 強以下の震災におおむね対応可能であることが示された。しかし、震度 7 の震災時に緊急遮断弁が作動しなければ、通水の停止はほとんど期待できないことが示された。この結果から、対策の実施が有意義であることを確認した。それとともに、地震時における緊急遮断弁の信頼性向上を図る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新たな被害リスクとなって、地域住民の生命や財産に関わる重大な二次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⁾。活発な地震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⁾。そうした被災による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⁾に対する構造物の耐震設計が進められてきた。しかし、大規模地震災害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防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、災害対応に必要な資源である人、情報通信、設備機器、インフラ、エネルギーもまた被災して、その機能が喪失あるいは著しく低下してしまう状況が考えられる⁸⁾。現在、施設管理者により想

定されている震災時の災害対応は、それに必要な資源のすべてが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、現状の災害対応計画のままでは、万一の大規模地震時において、効果的な災害対応を実施できないおそれがある。したがって、大規模地震時における不確実な被害に対応するためには、起こり得る多様な被害想定に備えた災害対応力の強化が必要である。

そこで、本研究では、大規模な農業水利施設を対象に、震災時の管理システムおよび管理体制を強化する対策の提案を目的とする。

2. 本研究の背景と概要

2.1 大規模地震災害時に想定される被害

北海道では灌漑期の通水量が $10\text{m}^3/\text{s}$ をこえる開水路施設や配水系の静水圧が 1MPa 相当である高圧のパイプライン施設が多数供用されている。そうした大規模な農業水利施設のうち、代表的な開水路施設の外観を図-1に示す。灌漑用水路には河川における高水敷や堤防敷に相当する余裕幅がほとんどない。また、その水路沿線には農地ばかりでなく、住宅地や道路などの生活圏に隣接している場所も少なくない(図-2)。それゆえ、こうした基幹的な灌漑用水路施設の被災は、その受益者の営農に支障を与えるばかりではなく、図-3に示すように、水路から多量の水が流出する事態となれば、その被災箇所付近の住宅地や道路などにも深刻な被害を与えるおそれがある。

2.2 大規模地震に備えた災害対応計画の必要性

現場の施設管理者は、以上のような被害発生時に行うべき災害対応行動を想定している。しかし、大規模地震時には、先に述べたとおり、災害対応の遂行に必要な資源もまた被害を受けて、その機能を喪失してしまうおそれがある(図-4)。このため、大規模地震時には、既存の計画に従って災害対応を遂行できる保障はない。それゆえ、大規模地震時における災害対応を確実に遂行させるためには、大規模地震時に起こり得る多種多様な被害リスクを明らかにして、それに対する対策を備えた新たな災害対応計画を策定することが必要である。

しかし、こうした震災時の減災対策に関連した既往の研究や取組の報告は少ない。ため池防災に関わるハザードマップの作成や決壊危険度の情報配信システムに関する研究¹⁰⁾¹¹⁾、あるいは施設機能の早期復旧の観点から施設の対策箇所や対策優先順位の意思決定を支援する地震リスクマネジメントに関する研究¹²⁾¹³⁾などが散見されるものの、大規模地震時の減災に主要な役

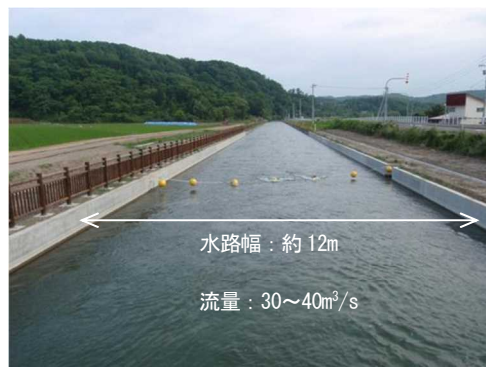


図-1 灌漑期における灌漑用水路の外観



図-2 用水路と住宅地の近接状況

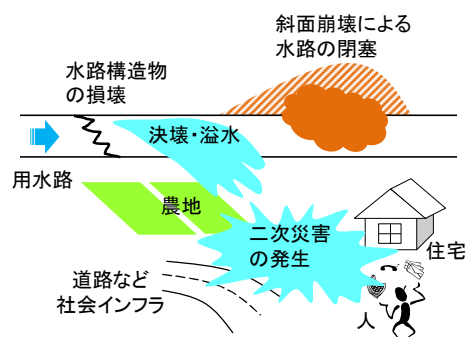


図-3 大規模地震時に想定される二次災害

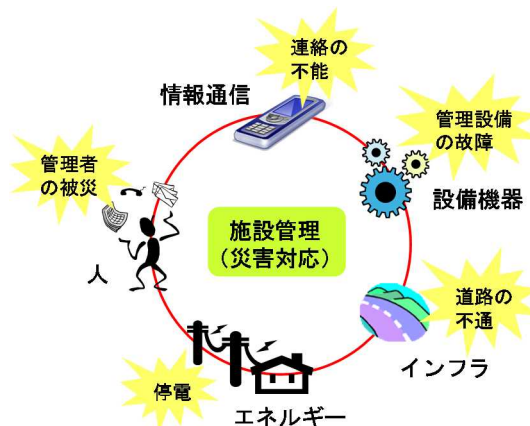


図-4 災害対応に必要な資源の被災

割を果たす施設管理者の災害対応行動を対象に、その課題の抽出や対策の検討を行った研究はみあたらない。本研究では、この点に焦点を当てて、大規模地震時における災害対応に関するリスク解析を行う。

2.3 事業継続計画の普及

近年、深刻な被害をもたらす大規模災害に対応する計画として、事業（業務）継続計画（BCP：Business Continuity Plan 以下、「BCP」）が注目されている。BCPとは、大規模な災害時においても最重要業務の継続あるいは早期復旧を図るため、それに必要な対策、方針、体制、手順を示した計画のことである¹⁴⁾。図-5に示すように、BCPでは、被害が起きることを前提にして、災害発生後の被害を事業継続の支障となる許容限界以下に留めるとともに、許容時間内に復旧することを目指して対策を計画する。

近年、とくにBCPの重要性が認識され、国や自治体でもBCP策定マニュアル¹⁵⁾を整備して、その普及に努めている。こうした取り組みを受けて農業水利施設を対象としたBCP策定マニュアル¹⁶⁾¹⁷⁾が一部の自治体で策定されている。また、平成28年度から農林水産省では、同省が作成したBCP策定マニュアル¹⁸⁾を活用して、全国的なBCP策定の普及・啓発を目的とした取り組みを推進している。以下、こうした農業水利施設を対象とした既存のBCP策定マニュアルを「既存のBCP策定マニュアル」と記す。

2.4 既存のBCP策定マニュアルの課題

大規模地震災害に備えるためには、まず、既存のBCP策定マニュアルに従ってBCPを策定することが必要である。ただし、既存のBCP策定マニュアルは汎用的かつ簡易的な内容であり、実際の施設にあてはめて活用する場合には、その施設の規模や特徴に応じた課題が考えられる。

例えば、既存のBCP策定マニュアルには、図-3に示した大規模地震発災直後における万一の二次災害発生を想定した緊急対応に関する記載がない。筆者らは、現場の施設管理者への聞き取り調査に基づいて、大規模地震時における災害対応を、発災直後の緊急対応と其後の点検・応急処置・早期復旧対応の2段階に分けて整理している。図-6に大規模開水路施設の場合についての模式図を示す。発災直後における第一段階の災害対応では、震災のショックでまだ混沌とした状況の中、施設管理者は水管理システムにより用水路内の水位を確認し、そこで万一水位に異常が認められれば、単独であってもただちに頭首工における取水ゲートを閉鎖して、二次災害の拡大を防止する。その後の第二

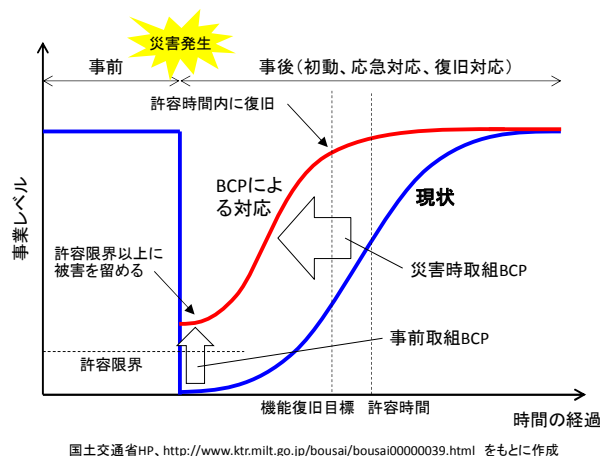


図-5 BCPにおける事業レベル回復の模式

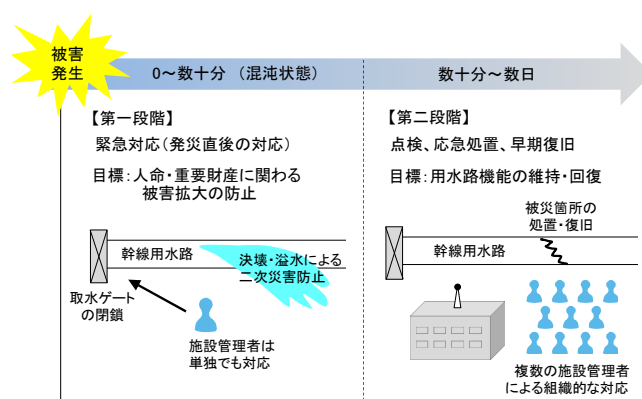


図-6 大規模地震発災後に想定される災害対応過程

段階の災害対応では、徐々に参集してきた複数の施設管理者により管理体制を整えたいうえで、組織的に施設の被災箇所の応急処置や水路全体の点検を行う。

ところが、既存のBCP策定マニュアルにおいて記載されている大規模地震発災後の初動は、まず、職員が参集して対策本部を立ち上げることから始まる。すなわち、既存のBCP策定マニュアルは、図-6における第二段階の災害対応行動の計画策定を対象とするものである。しかしながら、用水路施設における被害は発災直後から起こり得るものである。それと同時に、施設管理者は万一の施設被災による二次災害を防止するため、単独であっても緊急的な対応を独自の判断で遂行しなければならない。こうした発災直後の緊急対応に関する計画は、既存のBCP策定マニュアルとは別途に策定する必要がある。

また、既存のBCP策定マニュアルには被害想定や対策を検討する方法が示されていない。それゆえ、現状では、施設管理者や関係者の知見や経験、感覚を抛り所に被害想定や対策を議論するしかない。そこで、次のような検討方法が求められよう。

(1) 想定される被害を網羅的に特定する方法

大規模地震時には施設管理者の想定をこえる不測の被害が起こり得る。それゆえ、事前に考えられる可能な限りの被害リスクを論理的かつ網羅的に特定するための技術的方法が必要である。

(2) 被害の影響や対策の効果を評価する方法

災害対応への被害の影響や対策効果を定量的に評価することができれば、対策の要否や優先順位を合理的に議論することができる。それゆえ、最適な計画を策定するための評価手法が求められる。

2.5 本研究の概要

筆者らの目標は、既存のBCP策定マニュアルにおける以上のような課題を解決して、基幹的な灌漑用水路施設における効果的かつ効率的なBCPの策定手法を確立することである。そのための有力な方法として、本研究では、信頼性工学におけるリスク解析手法のひとつであるFTA (Fault Tree Analysis: 故障の木解析) に着目した。FTAとは、解析対象における望ましくない事象(頂上事象)を出発点として、その発生原因となる事象(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(基本事象)を網羅的に特定し、その基本事象に対する適切な対策を施すことにより、頂上事象の発現を低減する方法である¹⁹⁾。さらに、FTAでは、FT図上の基本事象に適切な発生確率を与えることにより、頂上事象の発生確率が算出でき、これを用いて対策の効果を定量的に評価することができる。すなわち、FTAを災害対応のリスク解析に適用することで、既存のBCP策定マニュアルにおける課題の解決にアプローチできるものと考えられる。

以上の観点から、本研究では、大規模地震発災直後の緊急対応、すなわち、初動から取水ゲート閉鎖(あるいはパイプラインの通水停止)に至るまでの災害対応(図-6に記す第一段階の災害対応)を対象に、FTAを用いたリスク解析を実施した²⁰⁾²¹⁾。本報告では、その主要な成果を取りまとめる。

3. 方法

3.1 FTAの概要

FTAは1960年代に米国のベル研究所において考案されて以来、原子力工学や航空宇宙工学、化学工学分野で主に開発されてきた。今日ではあらゆる工学分野における信頼性・安全性の解析に適用されている²²⁾。土木工学分野では、施設構造物や土木設備の維持管理手法としてFTAが適用されている。例えば、部材の劣

化が橋梁全体のリスクに発展する過程をFTAにより明らかにした研究²³⁾や河川ポンプ設備の信頼性評価にFTAを適用した研究²⁴⁾などが挙げられる。防災分野では、都市ライフライン系の震災時の被害要因をFTAにより探索した研究²⁵⁾²⁶⁾などみられる。FTAには、こうした多様な分野における適用実績がある。ただし、本研究のような災害対応計画の策定技術としてFTAが適用された事例はほとんどない。しかし、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ことから、多様な資源が関連して成立する災害対応を解析する方法として適当であると考えられる。

本研究では、FTAを①解析対象の把握と頂上事象の設定、②FT図の作成、③対策の検討、④頂上事象の発生確率と対策効果の定量評価の手順で実施する。

その各手順を次に解説する。

3.2 解析対象の把握と頂上事象の設定

FTAの第一段階は、解析対象の内容や状況を把握することである。本研究では、北海道内における代表的な灌漑用水路施設として、次の①大規模開水路施設および②高圧パイプライン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の大規模開水路施設(以下、「S幹線用水路施設」)
 - 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の高圧パイプライン施設(以下、「Mパイプライン施設」)
- 各施設の施設管理者に、大規模地震時の用水路施設において想定される被害状況や災害対応について聞き取り調査を実施し、施設および施設管理の概要、および大規模地震時に想定される災害過程と災害対応について整理した。

3.3 FT図の作成

FTAの基本は、表-1に示す記号を用いて、頂上事象の発生原因が樹形状の図に整理されたFT図を作成することである。FT図の例を図-7に示す。頂上事象「設備操作の不能」が起こり得る直接的な原因となる事象を挙げて、それを頂上事象の下位に並べて書き出す。この場合は、中間事象「電動操作の不能」と「手動操作の不能」である。このとき、「電動操作の不能」および「手動操作の不能」の両方が生じた場合に、頂上事象「設備操作の不能」が発生するのでANDゲートを用いて結合する。中間事象「電動操作の不能」が生じる原因は、中間事象「電源の喪失」および基本事象

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: 上位事象の原因となる事象
○	基本事象	根本的な原因となる事象
∪	ORゲート	下位事象のひとつ以上が発生すれば上位事象が発生
∩	ANDゲート	下位事象のすべてが発生する場合に上位事象が発生

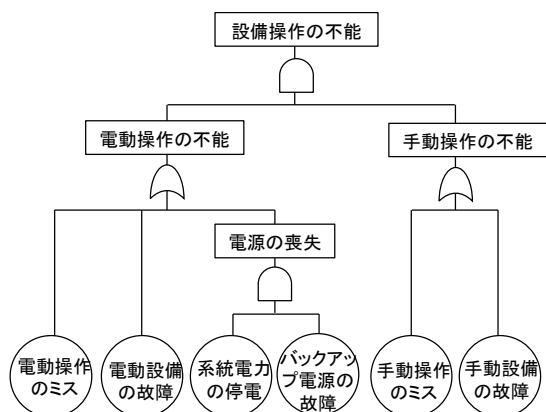


図-7 FT図の例

「電動操作のミス」、「電動設備の故障」が考えられる。この場合は、各事象のいずれかひとつが生じた場合に中間事象「電動操作の不能」が発生するので ORゲートを用いて結合する。中間事象「電源の喪失」の発生原因として、さらに「系統電力の停電」および「バックアップ電源の故障」の基本事象が考えられる。

以上のような規則と手順に従い FT 図を作成することで、本研究では、解析対象とする頂上事象が生じる根本的な原因となる基本事象を網羅的に特定した。なお、FT 図の作成作業には、発想の公平性や一般性を確保するため、複数名のチームにより作業にあたることを望ましい。本研究では、調査対象の施設管理者を含む 5 名または 6 名の技術者により FT 図を作成した。

3.4 対策の検討

FT 図により明らかとなった基本事象に対して適切な対策を施せば、頂上事象の発生を抑制することができる。ただし、施設管理の現場では、対策に支出できる予算の制約から実際に実施できる対策は限られたものになる。そこで、本研究では、各基本事象に対する対策を挙げるとともに、それらを実現性の高い対策と、コストや労力の制約から当面のところ実施困難な対策に分類・整理した。

3.5 頂上事象の発生確率と対策効果の定量評価

FTA では、FT 図を用いて頂上事象の発生確率を算

出することができる。FT 図における任意の事象の発生確率 P は、その直下の N 個の事象（中間事象または基本事象）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 (1) 式により、ORゲートの場合では (2) 式により算出される²⁷⁾。

$$P = \prod_{n=1}^N P_n \quad (1)$$

$$P = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_n) \quad (2)$$

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、(1)式および(2)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-7 に示した FT 図における頂上事象発生確率の算出事例を図-8 に示す。No.1~No.10 の各事象に添えた数字は発生確率である。No.7 と No.8 の基本事象は、その上位である No.4 の中間事象と AND ゲートで結合されているので、No.7 と No.8 の発生確率から(1)式を用いて No.4 の発生確率が求まる。さらに、No.5、No.6 の基本事象および No.4 の中間事象は、その上位の中間事象である No.2 と OR ゲートで結合されているので、No.5、No.6、No.4 の発生確率から(2)式を用いて No.2 の発生確率が算出される。同様にして、No.3 の発生確率が導かれ、最終的に No.2 および No.3 の発生確率から、No.1 の頂上事象の発生確率が求められる。

本研究では、異なる地震動規模における頂上事象の発生確率を比較評価する。そのため、震度 6 弱、震度 6 強、震度 7 の各震度階級²⁸⁾における基本事象の発生確率を各種文献・資料から設定し、(1)式および(2)式を用いて、頂上事象の発生確率を算出した。また、同様にして、対策実施後の各基本事象の発生確率を設定し

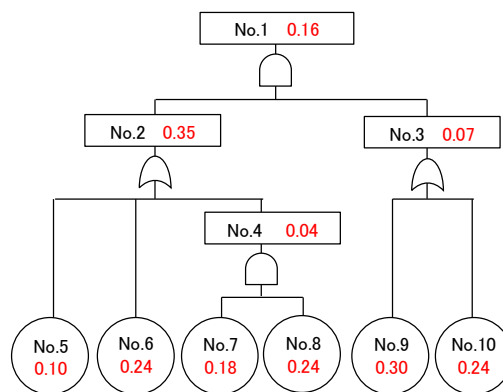


図-8 頂上事象の発生確率の算出例

て、その場合の頂上事象の発生確率を求めた。こうして得られた対策実施前と対策実施後の頂上事象の発生確率を比較することにより、期待される対策効果を定量的に評価した。

4. 結果および考察

4.1 大規模開水路施設 (S 幹線用水路施設)

4.1.1 施設管理の概要と震災時における災害対応

(1) 灌漑期における施設管理の概要

灌漑期における S 幹線用水路の施設管理に必要な主要設備は、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。図-9 にその施設管理の概要を示す。通常時、施設管理者は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 幹線用水路の起点となる頭首工施設には、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するとともに、放流ゲートを操作して水路全体の水位調整を行う。また、取水ゲート施設には停電時に備えてバックアップ電源を設置している。さらに、時間と労力を要するものの、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、各支線用水路の管理者（以下、「支線管理者」）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。

(2) 大規模地震時に想定される災害過程

S 幹線用水路施設が被災した場合に発生する二次災害として、図-10 に示すような決壊や溢水による浸水被害が想定される。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、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。このような事態が住宅地や主要道路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) 大規模地震発災後の災害対応

大規模地震発災後に施設管理者が想定している災害対応行動は、水管理システムにより用水路の水位状況を確認して、万一水位に異常が確認されれば、直ちに頭首工における取水ゲートを閉鎖して、決壊や溢水による浸水被害の元を断つことである。図-11 に大規模地震発災直後における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

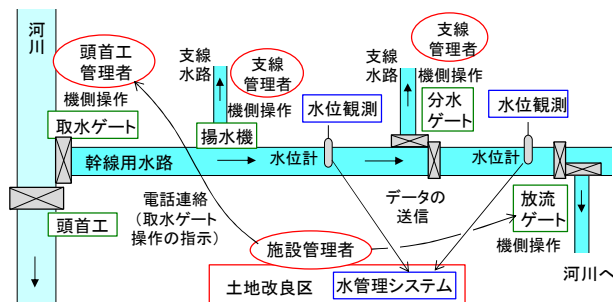


図-9 灌漑期における開水路施設管理の概要

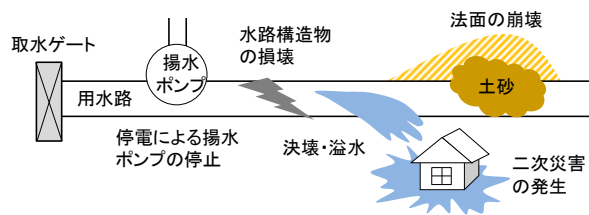


図-10 大規模地震時に想定される災害過程

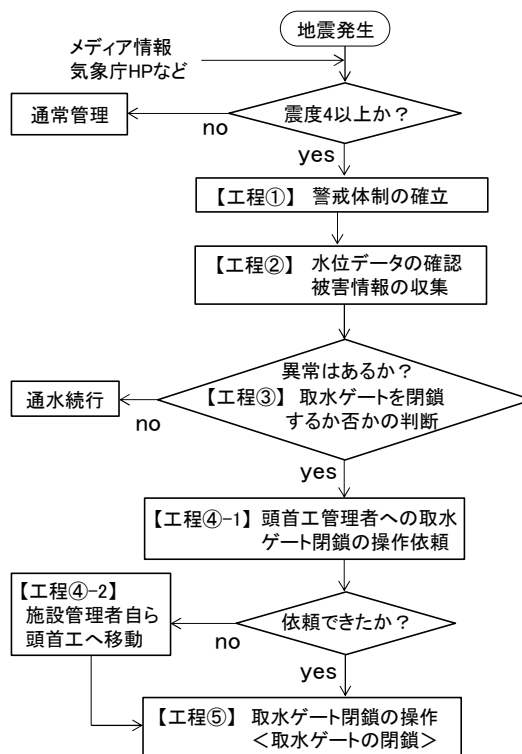


図-11 大規模地震発災後の災害対応の流れ

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）。次に、用水路施設における被害の有無を把握するため、施設管理者は水管理システムにおける水位データを確認する（工程②）。この水位データは、土地改良区事務所内のパソコンのほか、施設管理者が所持する携帯電話においても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、まず取水ゲート操作を依頼するため、頭首工管理者に連絡する（工程④-1）。しかし、頭首工管理者が不在あるいは連絡不通である場合は、施設管理者自らが頭首工施設へ急行する（工程④-2）。そして、頭首工管理室の操作卓にて、取水ゲートを閉鎖するための操作を行う（工程⑤）。

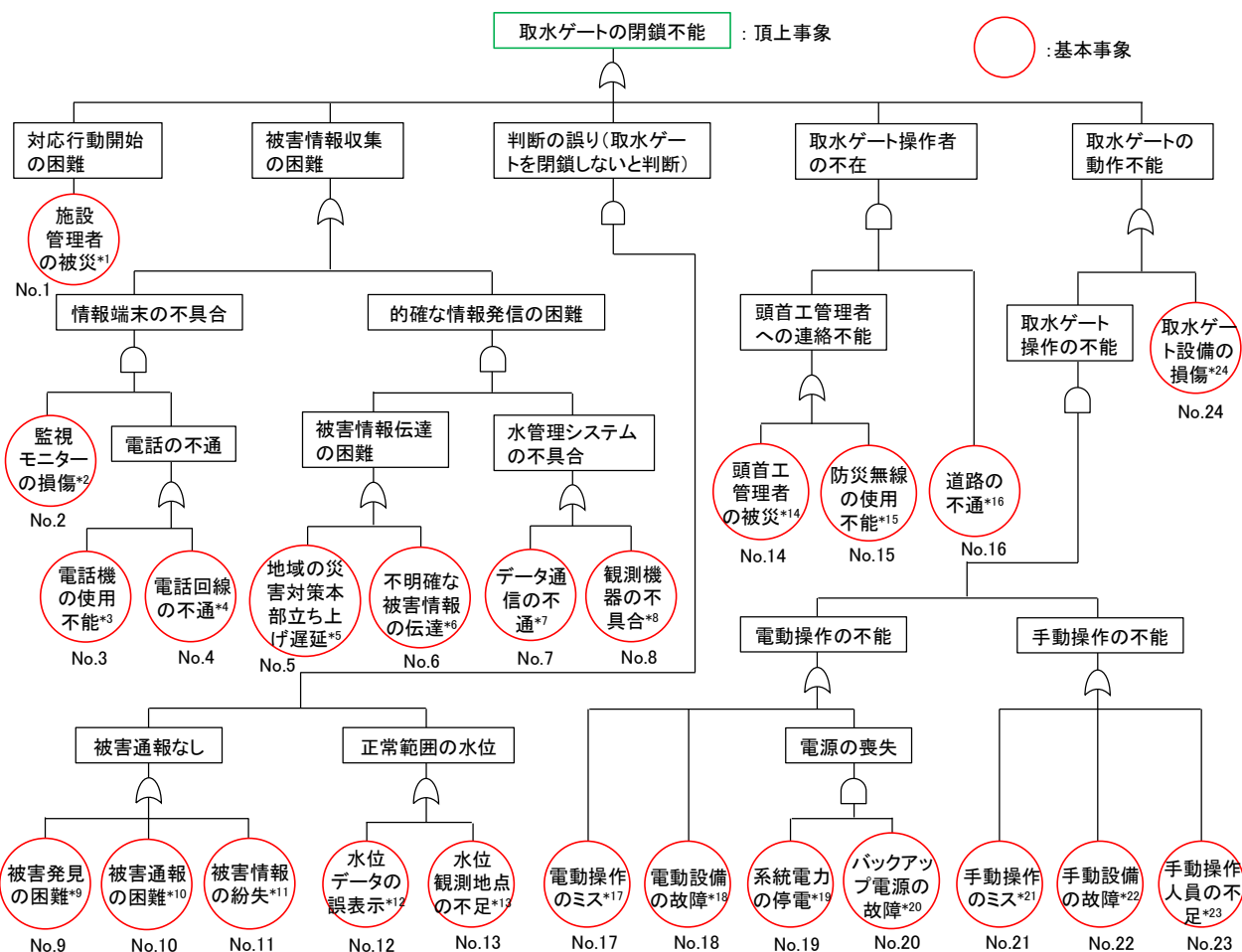
(4) 頂上事象の設定

以上に述べた一連の災害対応の目的は、取水ゲート

を速やかに閉鎖して、決壊や溢水による浸水被害の拡大を防止することである。そこで、本研究では、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FT図の頂上事象として設定した。

4.1.2 FT図による基本事象の特定

頂上事象を「取水ゲートの閉鎖不能」とするFT図を図-12に示す。最初に取水ゲートが閉鎖されるためには、災害対応工程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」が発生する第一の原因は、工程①～⑤のいずれかの工程が実施不能になる場合である。すなわち、各工程が実施不能となる事象である、「対応行動



*1 施設管理者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関わらず施設管理者はそれを正しい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損傷

図-12 「取水ゲートの閉鎖不能」を頂上事象とするFT図

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」が最初の中間事象となる。これらの中間事象は、そのいず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。これらの各中間事象について FT 図を展開して、その発生原因となる No.1~No.24 の基本事象を特定した。ただし、本研究では、施設管理の範囲を超える事象が得られた時点、あるいは一定の対策方針が明らかとなった時点で、その事象を基本事象とした。例えば、前者の事例として、「施設管理者の被災」に対する対策は、個人の備えによるものであることから、これを基本事象とした。また、後者の事例として、「監視モニターの損傷」に対して、監視用パソコンの転倒防止などの対策が考えられたことから、これを基本事象とした。

4.1.3 基本事象に対する対策

(1) 対策の分類

基本事象に対する対策を表-2に示す。対策実施の実現性が高い順に、①施設管理者により実施可能な対策、②管理体制を強化する対策、③施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策、④構造物や社会インフラの耐震強化が必要な対策に分類・整理した。以下、各対策について解説する。

(2) 施設管理者により実施可能な対策

携帯電話の不携帯や防災無線の使用法の忘却、機械設備の操作ミスは、震災時のパニック状況における施設管理者のヒューマンエラーである。震災時における施設管理者の心的状況を考慮して、ミスが生じにくいシステムの構築が必要である。水位観測機器などの故障リスクに対しては、観測機器の転倒防止や振動破壊に対する対策を施すことのほか、強振を受けた場合や異常水位となった場合に現地の観測機器が正しい値を表示するのか、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確実に捉えることができないおそれがある。豪雨時の管理実績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、観測設備の増設を検討する必要がある。

これらの対策実施に際しては、施設管理者の労力を要するものの、現場における費用負担は少ない。それゆえ、現状の施設管理の枠組みにおいて実施可能な対策であると考えられる。

(3) 管理体制を強化する対策

大規模地震時には、通常時の施設管理者が被災する

表-2 基本事象に対する対策

No.	基本事象	対策	対策の枠組み
3	電話機の使用不能		
15	防災無線の使用不能	ヒューマンエラー対策	
17	電動操作のミス		
21	手動操作のミス		
2	監視モニターの損傷	転倒防止などの対策	①施設管理者により実施可能な対策
8	観測機器の不具合	振動による故障や転倒に対する対策	
12	水位データの誤表示	振動や異常水位による誤表示の確認	
13	水位観測地点の不足	水位観測設備の増設	
1	施設管理者の被災	施設管理者の養成・増員	②管理体制を強化する対策
14	頭首工管理者の被災		
23	手動操作人員の不足	頭首工施設への参集	
5	地域の災害対策本部立ち上げ遅延	地域行政の危機管理対策の強化	③施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策
11	被害情報の紛失		
6	不明確な被害情報の伝達	地域住民を含む災害対応計画の策定	
9	被害発見の困難		
10	被害通報の困難	住宅における耐震対策	
4	電話回線の不通	情報通信機能の強化	
7	データ通信の不通		
16	道路の不通	道路施設の耐震強化	④構造物や社会インフラの耐震強化に関わる対策
18	電動設備の故障		
20	バックアップ電源の故障	設備機器の耐震強化	
22	手動設備の故障		
19	系統電力の停電	電力系統の耐震強化	
24	取水ゲート施設の損傷	施設構造物の耐震化	

ことも考えられる。その場合、その施設管理者に代わって災害対応に当れる管理者が必要となる。そのため、災害対応に必要な設備機器の操作に熟知した技術職員を養成するとともに、支線管理者や受益者から速やかに災害対応の支援が得られる体制づくりが必要である。

こうした管理体制の確立には、通常時の施設管理の範囲をこえて、施設に関わる関係者全体の枠組みの中で連携体制を議論していく必要がある。そのため、時間と労力を要するが、現場の費用負担は比較的少ないことから、実施可能な対策であると考えられる。

(4) 施設管理者と行政、地域住民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は地域住民である。その被害情報は、まず、市町村などに設置される地域の災害対策本部に通報され、そこから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に

における危機管理対策の強化が必要である。今後、地域防災計画が見直される中で、施設管理者と行政、地域住民の連携体制が明確に計画されることが望まれる。

(5) 構造物や社会インフラの耐震強化に関わる対策

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、施設管理の中で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。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、過去の震災時における既知のデータから、対象とする基本事象にみあった発生確率を次の4つの設定方法により推定した。

(1) 設定方法Ⅰ：既存のデータの適用

基本事象の発生確率と同等であるとみなせる既存のデータを適用する。例えば、施設管理者が対応行動を開始できない状況として、本人の被災だけでなく家族や隣人の被災、家屋の損壊などが考えられる。そこで、施設管理者の被災は震災時における建物の倒壊に等価であるとして、図-13に示すような、既報²⁹⁾における「木造住宅の全壊率」を「施設管理者の被災」の発生確率とみなして適用した。

(2) 設定方法Ⅱ：既存のデータに比例すると仮定

対象とする事象の発生確率が、既存のデータに比例するとみなして、その比例係数の推定により、対象とする基本事象の発生確率を設定する。例えば、東京都³⁰⁾における震災時の被害想定では、電話回線の不通率を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している。そこで、本研究では、通信機能の支障率は、木造住宅の全壊率に比例するものとみなした。札幌市³¹⁾における被害想定では、地震被害想定に記載されている震度6強における通信機能の支障率9.2%と震度6強における木造住宅の全壊率7.0%²⁹⁾から求めた係数1.314 (=9.2/7.0)を、各震度階級（この場合は震度6弱および震度7）における木造住宅の全壊率に乗じて、図-14に示すように、通信機能の支障率を算出した。

(3) 設定方法Ⅲ：2種類の既存のデータからの推定

対象とする基本事象の発生確率が、2種類の既存のデータの間値であると推定できるとき、その2種類の発生確率の平均を対象とする事象の発生確率として設定する。例えば、地震動による設備機器の故障率は、

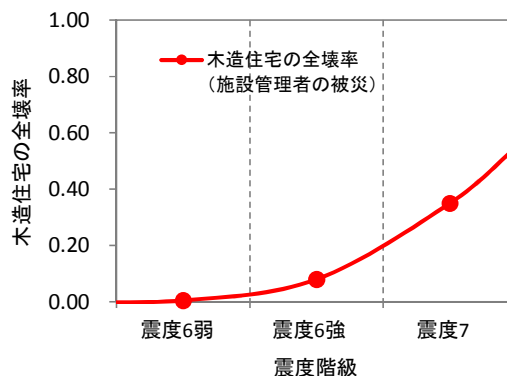


図-13 既存データを適用した事例

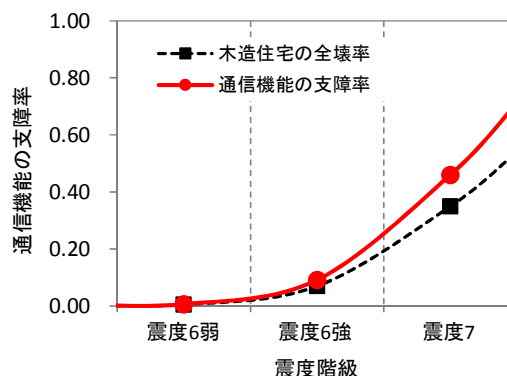


図-14 既存データに比例すると推定した事例

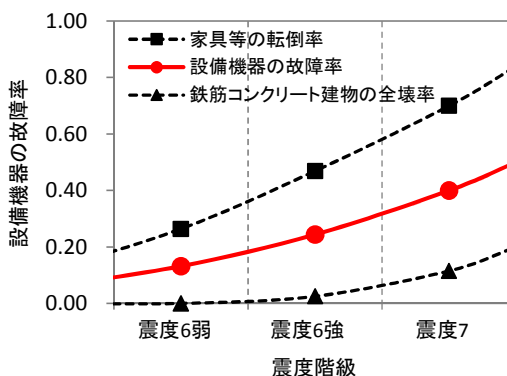


図-15 2種類の既存データの平均値とした事例

建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒率より小さいものと推定される。それゆえ、「設備機器の故障」の発生確率は、図-15に示すように、既存のデータ²⁹⁾である鉄筋コンクリート建物の全壊率と家具等の移動・転倒率の平均値とした。

(4) 設定方法Ⅳ：現地調査または施設管理者への聞き取りから設定

既存のデータの中に手がかりのない基本事象の発生確率は、現地調査や施設管理者への聞き取り調査により推定した。

表-3 基本事象の発生確率の設定

基本事象 No.	基本事象の発生確率			設定 方法	基本事象の発生確率の設定根拠
	震度6弱	震度6強	震度7		
1, 10, 14	0.005	0.070	0.350	I	震災時における木造住宅の全壊率 ²⁹⁾ を適用
2	0.264	0.469	0.700	I	震災時における家具等の移動・転倒率 ²⁹⁾ を適用
4, 7	0.007	0.092	0.460	II	通信機能の支障率は、電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における通信機能の支障率9.2% ³¹⁾ と震度6強における木造住宅の全壊率 ²⁹⁾ から、各震度階級の通信機能の支障率を設定
3, 6, 11, 15, 17, 21	0.056	0.100	0.149	II	ヒューマンエラーは機材の転倒など被害の視覚的認識に比例すると考え、パニック時のヒューマンエラーの発生率10% ³²⁾ と家具の移動・転倒率 ²⁹⁾ から、各震度階級のヒューマンエラーの発生率を設定
5, 22, 24	0.000	0.020	0.100	I	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 ²⁹⁾ を適用
8, 12, 18, 20	0.132	0.244	0.400	III	建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒率より小さいとして、鉄筋コンクリート建物の倒壊率 ²⁹⁾ と家具等の移動・転倒率 ²⁹⁾ の平均値を適用
9	0.300	0.300	0.300	IV	被害発見が困難となる状況として深夜を考え、震度階級によらず発生確率を0.3と設定
13	0.200	0.200	0.200	IV	豪雨時における施設管理者の経験から、震度階級によらず0.2と設定
16	0.000	0.030	0.150	I	震災時における道路のリンク閉塞率 ²⁹⁾ より推定
19	0.013	0.180	0.900	II	系統電力の停電率は電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における停電率18% ³¹⁾ と震度6強における木造住宅の全壊率 ²⁹⁾ から、各震度階級の停電率を設定
23	0.400	0.600	0.800	IV	現地調査および施設管理者への聞き取り調査により推定

以上の方法を用いて、すべての基本事象の発生確率を設定した。表-3に震度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の設定値を示す。

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、(1)式および(2)式を用いて、頂上事象の発生確率を求めた。図-16に震度6弱、震度6強、震度7の各震度階級における頂上事象「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、従来の災害対応がおおむね支障なく遂行できるものと考えられる。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が遂行不能になるおそれがある。すなわち、震度6強以上の震災により、万一用水路施設が被災して二次災害が発生しても、同時に災害対応もまた遂行不能となり、被害の拡大を防止できない状況になることが考えられる。

4.1.6 対策後における基本事象の発生確率の想定

施設管理の現場では、限られた予算の制約の中で、当面のところ実施可能な対策は何かということが現実の問題として重要である。そこで、本研究では表-2に挙げた対策のうち、「①施設管理者により実施可能な対策」および「②管理体制を強化する対策」を実施した場合について、その対策効果を評価することとした。また、以降の結果および考察では、「対策」と記す場合は、ことわりのない限り①および②の対策を意味す

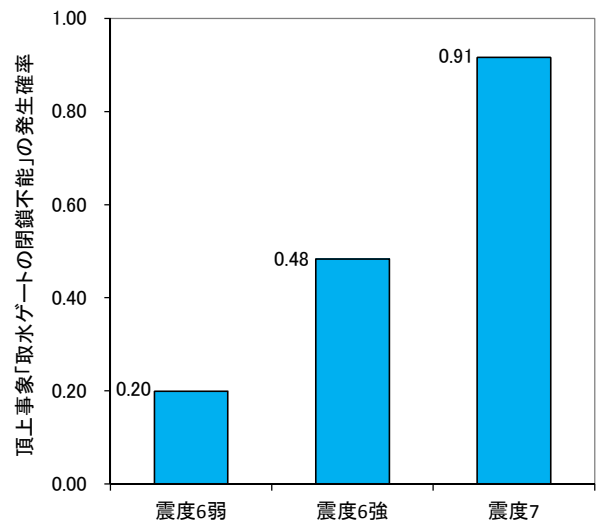


図-16 頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率

るものとする。

表-4に対策実施により低減する基本事象の発生確率の想定を示す。ヒューマンエラー対策の実施により、震災時のパニック状態におけるヒューマンエラーが通常時のヒューマンエラーの発生頻度まで低減されるとして、対策実施後の基本事象の発生確率は、対策実施前の発生確率の1/10であるとした。観測機器の故障の発生確率は、機器の固定など振動に対する強化対策を施すことにより、対策実施前の50%に低減されると想定した。また、用水路に被害が生じた場合の水位は、豪雨時の管理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ものとして、

表-4 対策実施後における基本事象の発生確率の想定

対策の枠組み	基本事象 No.	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
①施設管理者により実施可能な対策	3, 15, 17, 21	ヒューマンエラー対策	対策前の発生確率の1/10に減
	2, 8, 12	転倒防止対策 故障防止対策	対策前の発生確率の50%減
	13	水位観測設備の増設	ゼロリスク(発生確率0)
②管理体制を強化する対策	1, 14	施設管理者の養成・増員	2倍に増員 対策前の発生確率の2乗
	23	頭首工施設への参集	

本研究では、対策実施後はゼロリスク、すなわち、その発生確率は0であるとした。

また、現状の施設管理において管理体制を強化する対策は、基本的に災害対応に当たることができる人員、すなわち通常の管理者が被災しても、それを代替できる要員を増員することである。本研究では、現状の体制の2倍相当への増員をみこむものと設定した。

4.1.7 対策実施後に期待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期待される頂上事象「取水ゲートの閉鎖不能」の発生確率を図-17に示す。「施設管理者により実施可能な対策」を講じることで、頂上事象の発生確率は、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。さらに、「管理体制を強化する対策」を実施することにより、頂上事象の発生確率は、震度6弱では0.05、震度6強では0.19、震度7では0.69となった。震度6強以下の震災では、対策実施により災害対応を阻害するリスクをおおむね解消することができ、計画どおりの災害対

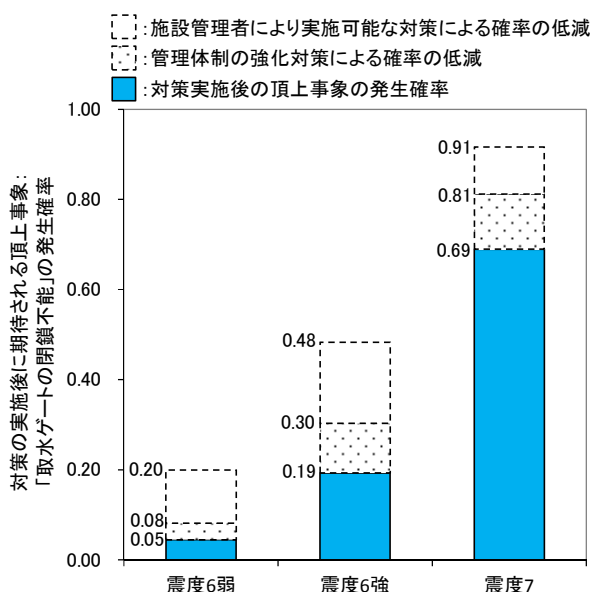


図-17 対策実施後における頂上事象の発生確率

応が遂行できる可能性が高まった。しかし、震度7の震災においては、対策効果は見込まれるものの依然として頂上事象の発生確率は高い。

以上の結果から、震度6強までの震災であれば、施設管理者により実施可能な対策および管理体制を強化する対策により、一定の効果が期待できることが分かった。しかし、震度7の最大級の地震動を受けた場合には、対策の効果は限定的で、依然として災害対応を従来の計画通りに遂行することは困難であることが示唆された。このことは、震度7の最大級の震災に対応するためには、本研究で想定した対策を実施するのみでは限界があることを意味する。そのため、取水ゲートが閉鎖できない状況を考慮して、その代替手段を備える災害対応計画の策定が必要になる。

4.1.8 大規模開水路施設における大規模地震対策の提案

(1) 管理システムにおける対策の提案

施設管理において現実に対策を行うためには、表-2に挙げた対策を、対象施設の状況に応じて、さらに具体的化していかなければならない。例えば、ヒューマンエラー対策といっても、それには多種多様な対策内容が考えられる。その対策内容を明確にするため、対策を実施する各基本事象を対象に、あらためてFT図を展開した対策検討FTAを実施する。その一例として、図-18に「電動操作ミス」を対象とした対策検討FTAを示す。ただし、この場合は、対策を具体化することが目的であるため、ANDゲートやORゲートなどの論理記号は記載しない。ここでは、次の4対策が挙げられた。

① 取水ゲート操作を熟知した管理者の養成

大規模地震災害時には、施設管理者自身が被災して、災害対応が遂行できない状況が考えられる。そのため、

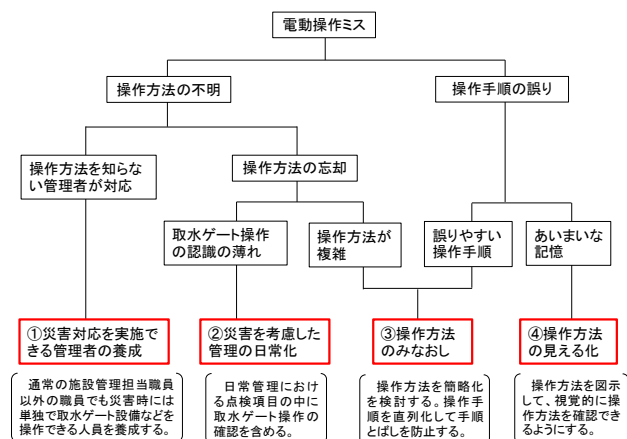


図-18 「電動操作ミス」を対象とした対策検討FTA

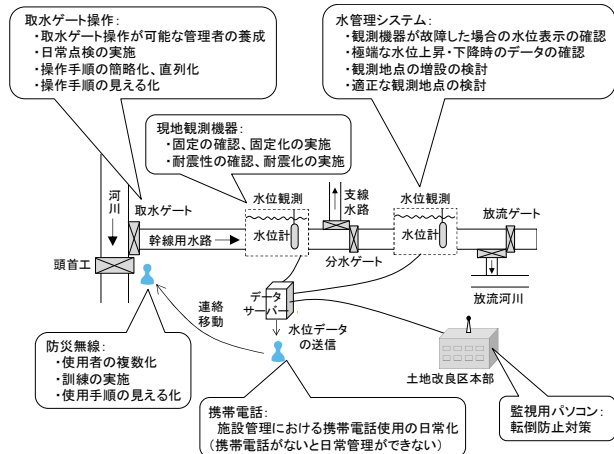


図-19 管理システムにおける対策

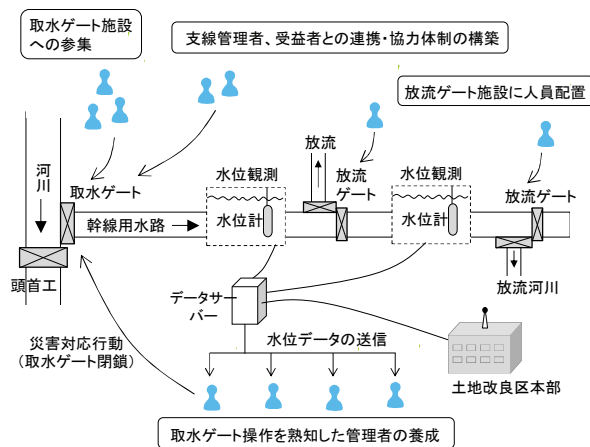


図-20 管理体制における対策

通常の施設管理者以外の職員でも、震災時には単独で災害対応を実施できるように、取水ゲート設備の操作に熟知した職員を養成する。

② 操作方法の日常管理における確認

通常時は、施設管理者が頭首工管理者に操作を依頼して取水ゲートの開閉を行う。そのため、施設管理者の取水ゲート操作方法の忘却を防止するため、通常の施設管理において取水ゲート操作方法を確認するような仕組みを導入する。

③ 操作方法の簡略化および直列化の検討

大規模地震時にはパニック状態となり、取水ゲートの操作方法の忘却や誤りが生じることが考えられる。操作方法の簡略化および直列化（前段の操作を完全に終了しないと次の段階の操作ができないしくみ）を検討して、操作ミスのリスクを低減する。

④ 操作方法の見える化

操作方法を明確に図示することにより、視覚的に操作方法を確認できるようにする。

このような対策検討 FTA を各基本事象に対して実施して、得られた具体的な対策を図-19 に示す。対策を実施する主な対象は、施設管理者による取水ゲートの操作と水管理システムに関わる内容である。

(2) 管理体制における対策の提案

本研究における災害対応のリスク解析から、大規模地震時に備えた管理体制に関して、図-20 に示す次のような対策が考えられた。

① 各種設備機器の操作に熟知した管理者の養成

先に述べたとおり、通常時の施設管理者の被災に備えて、通常の施設管理者以外の職員でも災害対応が遂行できるような体制を備えておくことが必要である。そのため、土地改良区の中で、災害対応に必要な設備

機器の操作に熟知した職員を養成する。

② 放流ゲートの開放

FTA 手法による対策評価の結果から、震度 7 では取水ゲートが閉鎖不能になる確率が高い。それゆえ、大規模地震時には、取水ゲートを閉鎖する対応と同時に、放流ゲート（S 幹線用水路内には 8 箇所の放流ゲートがある）を開放して、水路内の水位低下を図る対応も必要となる。

③ 各ゲート施設への人員配置

万一の施設被災により二次災害が発生した場合、迅速にその対応に当たるため、従来の管理体制のように職員全員が土地改良区本部に参集するのではなく、取水ゲート施設や各放流ゲート施設に直接参集するように人員配置を計画する。

④ 施設管理者と受益者の連携体制の構築

取水ゲートおよび放流ゲート全体において対応を行うためには、土地改良区の施設管理者のみでは人員不足となる。そのため、施設管理者は支線管理者や受益者と協力して災害対応が遂行できるように連携体制を構築する。

(3) 本研究において提案する対策のまとめ

以上に記した管理システムおよび管理体制における対策には重複する部分があるので、あらためて表-5 に対策を取りまとめる。これ以上の対策内容の具体化は、施設管理現場において議論する内容である。例えば、定期点検をどのように進めていくか、どのように図化すれば分かりやすいかなどは、各現場の具体的な状況に応じて検討を要する課題である。

4.1.9 大規模開水路施設に関するまとめ

本研究では、大規模地震時における災害対応の遂行を阻害する原因に対して、施設管理者が経費をかけず

表-5 大規模開水路の施設管理において実施可能な対策（本研究において提案する対策）

対策	項目	内容
ヒューマンエラー対策	施設管理における確認（管理の日常化）	施設管理において携帯電話の使用を日常化する。 防災無線使用方法の確認を日常管理において実施する。 取水ゲート操作方法の確認を日常管理において実施する。
	操作方法の簡略化・直列化	取水ゲート操作（電動操作、手動操作）方法の簡略化および直列化を検討する。
	操作方法の見える化	防災無線使用方法およびゲート操作方法を図示するなど明確に確認できるようにする。
観測機器の破損防止対策	転倒防止	事務所内の監視用パソコンなどの転倒防止対策を実施する。 現地観測機器の転倒防止対策を実施する。
	故障防止	現地観測機器の耐震性の確認および振動による故障の防止対策を実施する。
水管理システムの強化	水位の誤表示の解消	観測機器が故障したことが確認できるしくみを構築する。 極端な水位変化が生じて正しい水位が観測できるシステムを構築する。
	水位観測の精度向上	過去の水位データおよびシミュレーションにより現状の水位観測の妥当性の確認する。 その結果、観測地点数に不足があれば、その適切な配置検討と増設を行う。
管理体制に関する対策	施設管理者の養成	通常の施設管理者が被災しても、他の施設管理者により災害対応が遂行できるように、各ゲート設備の操作に熟知した管理者を養成する。
	放流ゲートの開放	取水ゲートが閉鎖できない場合に備えて、放流ゲートを開放する対応計画を策定する。
	各ゲート施設への人員配置	発災後、施設管理者は、土地改良区本部に参集するのではなく、直接、取水ゲート施設および放流ゲート施設に配置するような計画を策定する。
	連携体制の構築	人員不足を補うため、施設管理者、支線管理者および受益者の連携体制を構築する。

に実施できる対策の効果をFTAによって評価した。その主要な結果を次にまとめる。

- 1) 対策を実施していない現状の場合、震度6弱以下の震災であれば、計画どおりの災害対応が概ね支障なく遂行できる。しかし、震度6強以上の震災であれば、従来の災害対応が遂行不能になるおそれがある。
- 2) 対策を実施した場合、震度6強以下の震災であれば一定の対策効果が期待でき、従来の災害対応が計画どおり遂行できる可能性が高まる。しかし、震度7の震災では、対策の効果が限定的なものになり、依然として災害対応が遂行不能になるおそれがある。
- 3) 以上の結果から、表-5に示した対策を講じる計画策定が有意義である。一方、取水ゲートが閉鎖できない場合を考慮した放流ゲート操作など他の代替手段を含む計画策定も必要である。

4.2 高圧パイプライン施設（Mパイプライン施設）

4.2.1 施設管理の概要と震災時における災害対応

(1) 灌漑期における施設管理の概要

Mパイプライン施設の管理に必要となる主要な設備は、図-21に示すように制水ゲート、ファームポンド（以下、「FP」）、緊急遮断弁、制水弁および水管理システムである。通常時、施設管理者は中央管理セン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FP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

線を巡回して主要設備を目視点検する。緊急遮断弁は、各FP直下に設置されており、管体の破損事故などによる漏水発生時に、FPや管内の貯留水を流出させないための設備である。管内の流速が設定値をこえると、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) 大規模地震時に想定される災害過程

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模式を図-22に示す。地震動により管体が破損すれば、そこから多量の水が流出することになる。Mパイプラインの配水系は1MPaに近い水圧であるため、管体の破損箇所から多量の水が爆発的に噴出する

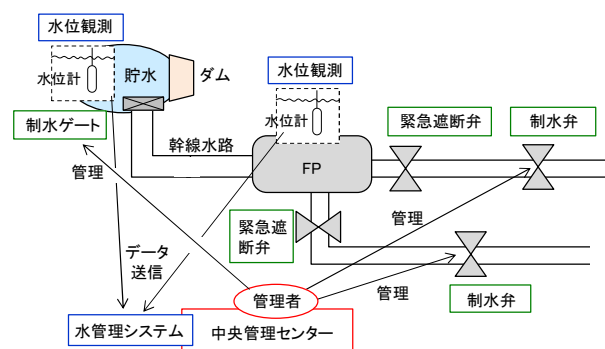


図-21 灌漑期におけるパイプライン施設管理の概要

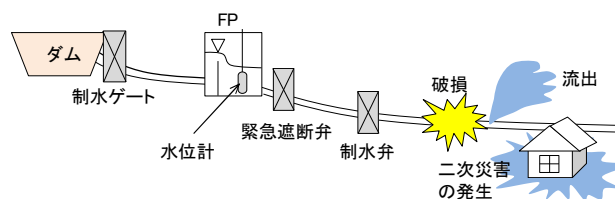


図-22 大規模地震時に想定される災害過程

ことも考えられる。このような被害が住宅地付近や主要道路近傍において生じたとすれば、人命や重要財産を損なう最悪の事態となることも考えられる。

こうした地震時におけるパイプラインの破損や継手部の離脱などの原因のひとつとして、地震動に伴う水撃圧が考えられる³³⁾。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、本研究では、地震時における水撃圧データの取得を目的として、Mパイプライン施設における水圧の常時観測を実施した。図-23に観測方法の模式図を示す。観測対象の管路は、管径φ300、静水圧約0.9MPaのDCIP管である。空気弁の水抜き用のゲートバルブを利用して圧力計を設置し、空気弁施設底部のコンクリート基礎部に加速度計を固定した。本観測では、通常時100Hzでデータを取得するが、地震発生時には1kHzでデータを取得するシステムとしている。2014年1月に観測を開始してから現在(2016年6月)までのところ、観測地では震度5以上の地震は起きていない。しかし、これまでの観測データから、図-24に示すように、地震動の到達に伴って水撃圧が発生していることが確認された。この場合、主要な地震動が収まった10s以降でも、管内の水撃圧は収束せず、このときの最大水撃圧0.1MPaを観測した。このことから、管体は地震動が収まった後も水撃圧を受け続けることが示唆された。今後も同観測を継続的に実施していく方針である。

(3) 大規模地震発災後の災害対応

施設管理者はパイプラインとダムを一体的に管理している。そのため、地震発生時には、ダム管理とパイプライン管理に施設管理者は分散して対応に当たることになる。このような施設構成の中で、本研究では主にパイプラインを対象とした災害対応を対象に検討する。図-25に大規模地震発災後の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の一部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災害対応において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各FPの水位データを確認する(工程②)。その水位データに異常が認められれば、それと同時に緊急遮断弁の作動状況を確認する(工程③)。そこで、万一緊急遮断弁が作動していなければ、施設管理者は現地へ急行して、制水弁操作により通水を停止する(工程④)。

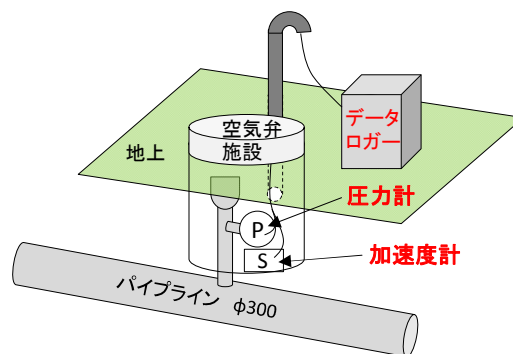


図-23 パイプライン中の水撃圧の観測方法

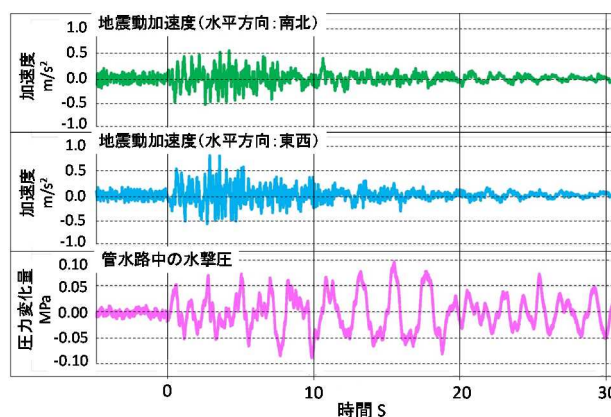


図-24 地震動に伴う水撃圧の観測例
(地震発生日時: 2016年1月14日12:26 震度4)

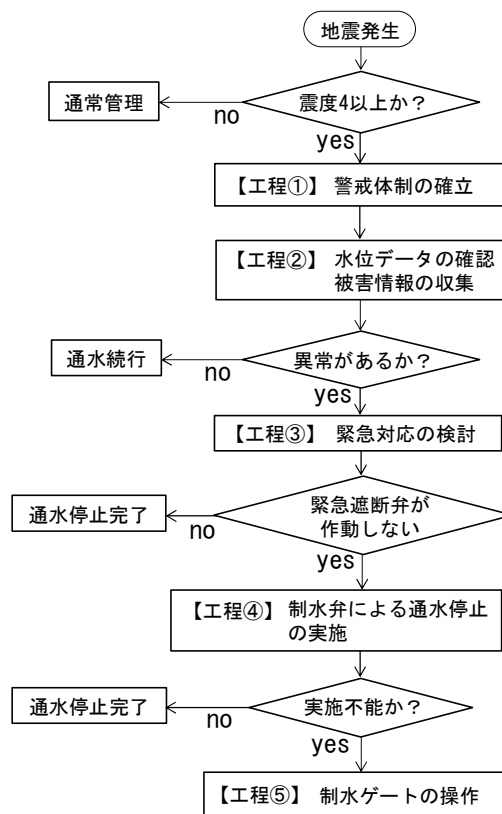


図-25 大規模地震発災後の災害対応の流れ

さらに制水弁操作が実施不能な状況であれば、ダム管理棟へ連絡して、ダム直下にある制水ゲートによりパイプライン全体の通水停止を連絡する。連絡を受けた管理者は、管理室内の操作卓において制水ゲートの操作を実施する（工程⑤）。

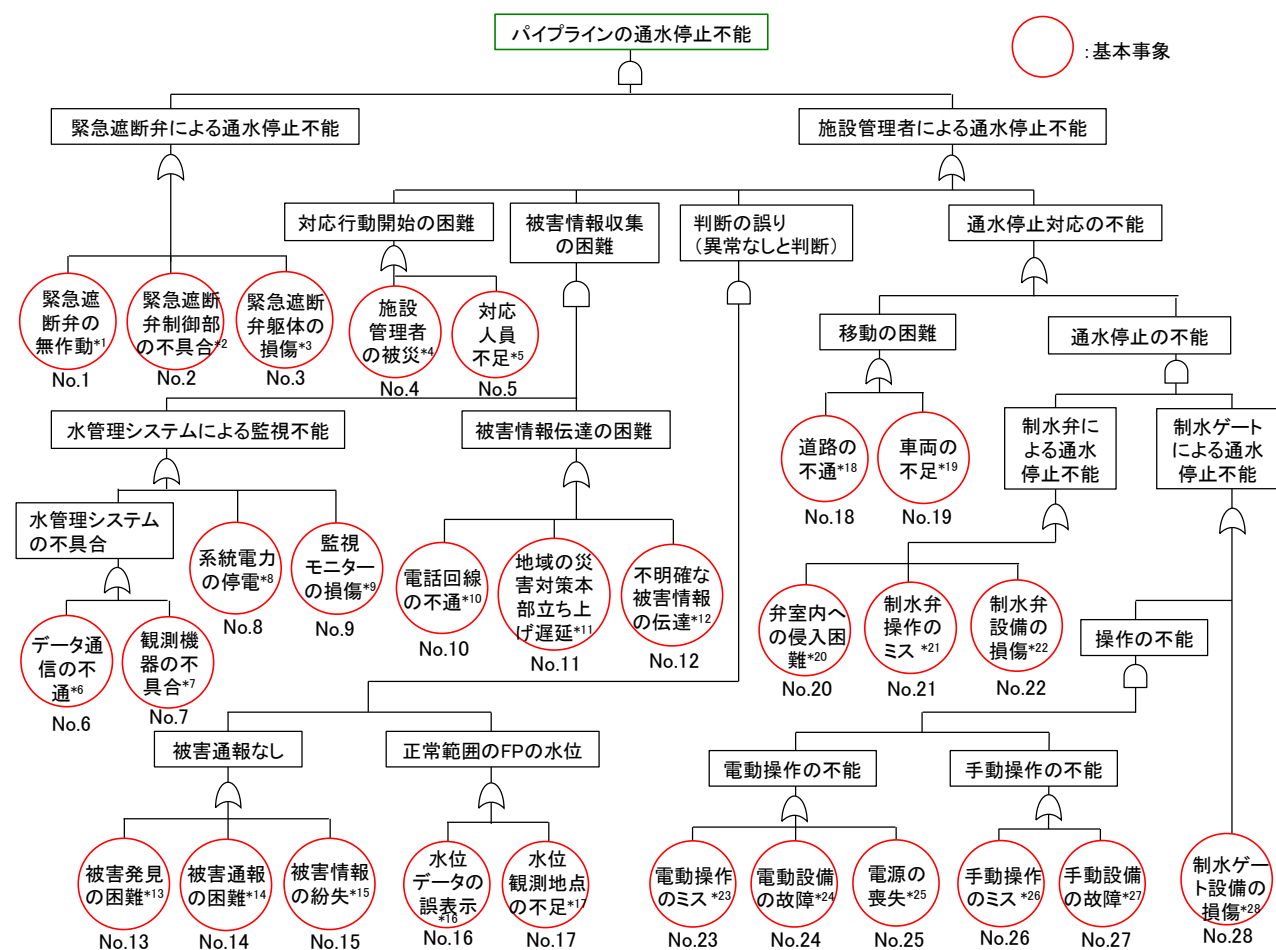
(4) 頂上事象の設定

以上に述べた一連の災害対応の目的は、パイプラインからの突発的な漏水による浸水被害の拡大を防止することである。そこで、本研究では、被害発生時に緊急遮断弁や制水弁、制水ゲートにより被災パイプの通水を停止できない状況、すなわち、「パイプラインの通水停止不能」をFT図の頂上事象として設定した。

4.2.2 FT図による基本事象の特定

頂上事象を「パイプラインの通水停止不能」とするFT図を図-26に示す。Mパイプライン施設における通水停止手段としては、緊急遮断弁による自動通水停止とその緊急遮断弁が作動しなかった場合の施設管理者による制水弁および制水ゲート操作による通水停止がある。それゆえ、頂上事象が起こる直接的な原因となる中間事象を「緊急遮断弁による通水停止不能」および「施設管理者による通水停止不能」とした。これらの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。

本施設の緊急遮断弁は、一般的な漏水事故に対応す



*1 緊急遮断弁が作動を開始する設定値の不適切による無作動、*2 緊急遮断弁の流量センサーなど制御機能の不具合、*3 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 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遮断、*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 夜間やひとけが少ない場所における被害発、*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 FPの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、*17 被災による急激な水位変化を捉えるためには、FPの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 制水弁の躯体の損傷、*23 制水ゲートの電動操作ミス、*24 地震動による電動設備の故障、*25 バックアップ電源の故障、*26 制水ゲートの手動操作ミス、*27 地震動による手動設備の故障、*28 制水ゲート躯体の損傷

図-26 「パイプラインの通水停止不能」を頂上事象とするFT図

るために設置されたもので、必ずしも地震時に対応した装備を有しているわけではない。それゆえ、震災時における緊急遮断弁が実際に作動するとは限らない。そこで、緊急遮断弁が正常に作動しない場合や、振動により制御部に不具合が生じる場合、緊急遮断弁自体が変形・破損して動作不能となる場合が中間事象「緊急遮断弁による通水停止不能」の発生原因として挙げられた。

また、緊急遮断弁が正常に作動しなければ、施設管理者は、ただちに被災箇所上流側の制水弁を閉鎖する対応を起こさなければならない。その施設管理者による災害対応行動を阻害する中間事象として「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）」、「通水停止対応の不能」が挙げられた。

上述した各中間事象に関して FT 図を展開して、その発生原因となる No.1～No.28 の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

基本事象に対する対策を表-6 に示す。対策実施の実現性が高い順に、①施設管理者により実施可能な対策、②管理体制を強化する対策、③施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策、④構造物や社会インフラの耐震強化が必要な対策に分類・整理した。以下、各対策について解説する。

(2) 施設管理者により実施可能な対策

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。水位観測機器などの故障リスクに対しては、観測機器の転倒防止や振動破壊に対する対策を施すことのほか、強振を受けた場合や異常水位となった場合に現地の観測機器が正しい値を表示するのか、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ことも考えられる。現地調査やシミュレーションにより現状の水位観測地点の妥当性を確認し、必要に応じて観測設備の増強を図ることが必要である。また、緊急遮断弁が作動しない原因として、動作開始の基準となる設定値が不適切であるということが考えられる。現地調査や過去のデータから現状の設定値を再確認する必要がある。

以上の対策実施には、施設管理者の労力を要するも

表-6 基本事象に対する対策

No.	基本事象	対策	対策の枠組み
21	制水弁操作のミス		
23	電動操作のミス	ヒューマンエラー対策	
26	手動操作のミス		
9	監視モニターの損傷	転倒防止などの対策	
7	観測機器の不具合	振動による故障や転倒に対する対策	①施設管理者により実施可能な対策
16	水位データの誤表示	振動や異常水位による誤表示の確認	
17	水位観測地点の不足	水位観測設備の増設	
1	緊急遮断弁の無作動	現地の点検・確認	
20	弁室内への侵入困難		
4	施設管理者の被災	施設管理者の養成	
5	対応人員の不足	受益者を含めた管理体制の構築	②管理体制を強化する対策
19	車両の不足	車両使用の協力体制の構築	
11	地域の災害対策本部立ち上げ遅延	地域行政の危機管理対策の強化	③施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策
15	被害情報の紛失		
12	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	
13	被害発見の困難		
14	被害通報の困難	住宅における耐震対策	
10	電話回線の不通	情報通信機能の強化	
6	データ通信の不通		
18	道路の不通	道路施設の耐震強化	
2	緊急遮断弁制御部の不具合		④構造物や社会インフラの耐震強化に関わる対策
24	電動設備の故障	設備機器の耐震強化	
25	電源の喪失		
27	手動設備の故障		
3	緊急遮断弁躯体の損傷		
22	制水弁設備の損傷	施設構造物の耐震化	
28	制水ゲート施設の損傷		

の、現場のコスト負担は少ない。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) 管理体制を強化する対策

震災時には、ダム管理に人員が割かれるため、パイプラインの災害対応を遂行する人員の不足が懸念される。それゆえ、緊急的な災害対応に当たれる技術職員を養成するとともに、行政機関の他部門の職員や受益者などの関係者から速やかに災害対応の協力が得られる体制づくりが必要である。

こうした管理体制を確立するためには、通常施設管理の範囲をこえて、施設に関わる関係者全体の枠組みの中で連携体制を議論していく必要がある。そのため、時間と労力を要するが、現場の費用負担は比較的少ないことから、実施可能な対策であると考えられる。

(4) 施設管理者と行政、地域住民の連携が必要な対策

パイプライン施設に被害が生じた場合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

表-7 基本事象の発生確率の設定

基本事象 No.	基本事象の発生確率			設定 方法	基本事象の発生確率の設定根拠
	震度6弱	震度6強	震度7		
4, 14	0.005	0.070	0.350	I	震災時における木造住宅の全壊率 ²⁹⁾ を適用
9	0.264	0.469	0.700	I	震災時における家具等の移動・転倒率 ²⁹⁾ を適用
6, 10	0.007	0.092	0.460	II	通信機能の支障率は、電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における通信機能の支障率9.2% ³¹⁾ と震度6強における木造住宅の全壊率 ²⁹⁾ から、各震度階級の通信機能の支障率を設定
12, 15, 21, 23, 26	0.056	0.100	0.149	II	ヒューマンエラーは機材の転倒など被害の視覚的認識に比例すると考え、パニック時のヒューマンエラーの発生率10% ³²⁾ と家具の移動・転倒率 ²⁹⁾ から、各震度階級のヒューマンエラーの発生率を設定
3, 11, 19, 22, 27, 28	0.000	0.020	0.100	I	震災時における鉄筋コンクリート建物の全壊率 ²⁹⁾ を適用
2, 7, 16, 24, 25	0.132	0.244	0.400	III	建物の倒壊率より大きく、設備機器の転倒率より小さいとして、鉄筋コンクリート建物の倒壊率 ²⁹⁾ と家具等の移動・転倒率 ²⁹⁾ の平均値を適用
13	0.300	0.300	0.300	IV	被害発見が困難となる状況として深夜を考え、震度階級によらず発生確率を0.3と設定
17	0.100	0.100	0.100	IV	豪雨時における施設管理者の経験から、震度階級によらず0.2と設定
18	0.000	0.030	0.150	I	震災時における道路のリンク閉塞率 ²⁹⁾ より推定
8	0.013	0.180	0.900	II	系統電力の停電率は電柱折損率および建物の全壊率に比例するとして、震度6強における停電率18% ³¹⁾ と震度6強における木造住宅の全壊率 ²⁹⁾ から、各震度階級の停電率を設定
1, 20	0.300	0.300	0.300	IV	現地調査および施設管理者への聞き取り調査により推定
5	0.200	0.400	0.800	IV	現地調査および施設管理者への聞き取り調査により推定

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、地域住民との連携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。今後、地域防災計画が見直される中で、施設管理者、行政および地域住民の連携体制が明確に計画されることが望まれる。

(5) 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「パイプラインの通水停止不能」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。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ものはほとんどない。そのため、4.1.4 項と同様に、過去の震災時における既存のデータおよび現地調査、聞き取り調査から、対象とする基本事象にみあった発生確率を推定した。表-7 に震度6弱、震度6強、震度7の各震度階級における基本事象の発生確率の設定値を示す。

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、(1)式および(2)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「パイプラインの通水停止不能」の

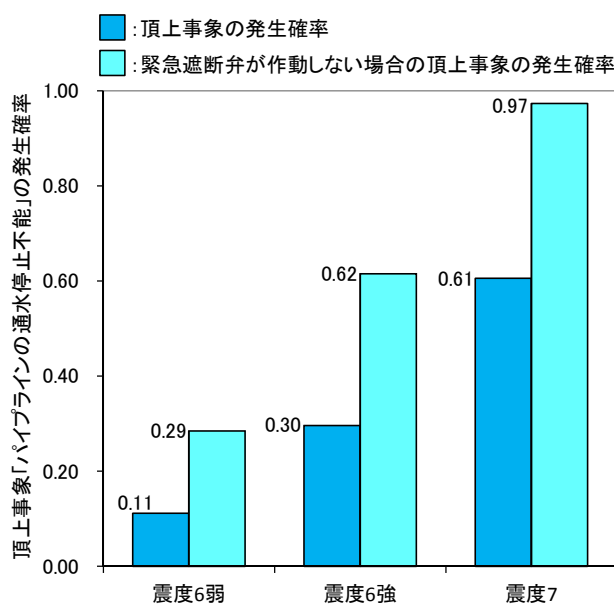


図-27 頂上事象「パイプラインの通水停止不能」の発生確率

発生確率を図-27 に示す。頂上事象の発生確率は、震度6弱では0.11、震度6強では0.30、震度7では0.61となった。震度6強以下の震災であれば、従来の災害対応がおおむね遂行可能であると考えられる。ただし、この評価では、緊急遮断弁による通水停止の効果が大きく寄与している。先に述べたように、緊急遮断弁は必ずしも震災時を想定して設計されているわけではなく、大規模地震時における動作の信頼性に関する情報にも乏しい。そこで、緊急遮断弁が作動しないことを前提とした頂上事象の発生確率を試算すると、震

度6弱では0.29、震度6強では0.62、震度7では0.97となった。この場合、震度6強以上の震災時における施設管理者による災害対応の遂行は、極めて困難になるものと考えられる。

4.2.6 対策後における基本事象の発生確率の想定

施設管理の現場では、限られた予算の制約の中で、実施可能な対策は何かということが現実問題として重要である。そこで、本研究では表-6に挙げた対策のうち、「①施設管理者により実施可能な対策」および「②管理体制を強化する対策」を実施した場合の効果を評価することとした。また、以降の結果および考察において、「対策」と記す場合は、ことわりのない限り①および②の対策を意味するものとする。

表-8に対策実施により低減する基本事象の発生確率の想定を示す。ヒューマンエラー対策の実施により、震災時のパニック状態におけるヒューマンエラーの発生確率が通常時のヒューマンエラーの発生頻度まで低減されるとして、対策実施後の基本事象の発生確率は、対策実施前の発生確率の1/10であるとした。観測機器の故障の発生確率は、機器の固定など振動に対する強化対策を施すことにより、対策実施前の50%に低減されると想定した。また、用水路に被害が生じた場合のファームポンドの水位は、現地調査やシミュレーションなどにより推定できることから、その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ものとして、本研究では、対策実施後はゼロリスク、すなわち、その発生確率は0であるとした。

また、現状の施設管理において管理体制を強化する対策は、基本的に現場において災害対応を遂行できる人員を増員することである。本研究では、現状の体制の2倍相当への増員をみこむものと設定した。

4.2.7 対策後の頂上事象の発生確率

以上の対策を講じることにより期待される頂上事象「パイプラインの通水停止不能」の発生確率を図-28に示す。「施設管理者により実施可能な対策」の実施により、頂上事象の発生確率は、震度6弱では0.06、震度6強では0.20、震度7では0.52となった。また、さらに「管理体制を強化する対策」を実施することにより、頂上事象の発生確率は震度6弱では0.02、震度6強では0.12、震度7では0.49となった。震度6強以下の震災では、対策を実施することにより、災害対応の遂行がより確実なものになり、震度7の震災においても、頂上事象の発生確率が0.5を下回る結果となった。

次に、緊急遮断弁が作動せず、施設管理者の対応行動により通水を停止する場合の頂上事象の発生確率を

表-8 対策実施後における基本事象の発生確率の想定

対策の枠組み	基本事象 No.	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
①施設管理者により実施可能な対策	21, 23, 26	ヒューマンエラー対策	対策前の発生確率の1/10に減
	7, 9, 16	転倒防止対策 故障防止対策	対策前の発生確率の50%減
	1, 20	現地の点検・確認	ゼロリスク(発生確率0)
	17	水位観測設備の増設	ゼロリスク(発生確率0)
②管理体制を強化する対策	4	施設管理実務者の養成	2倍に増員 対策前の発生確率の2乗
	5	受益者を含めた管理体制の構築	
	19	車両使用の協力体制の構築	

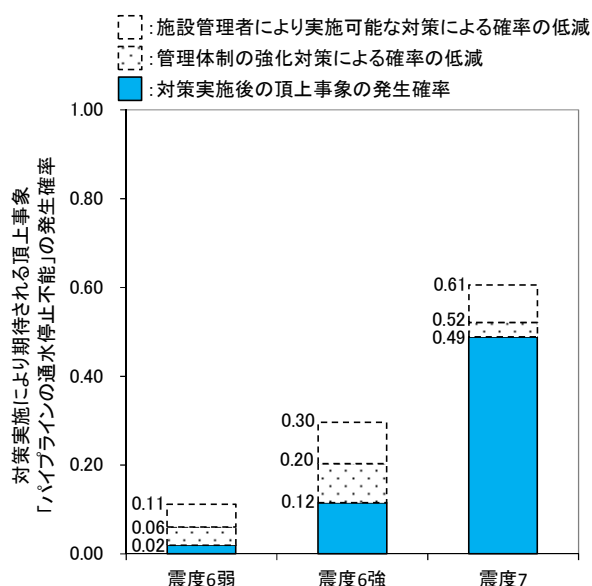


図-28 対策実施後における頂上事象の発生確率

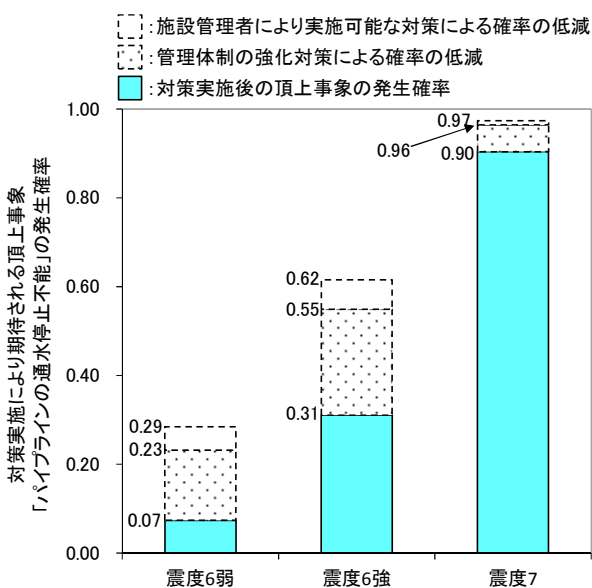


図-29 対策実施後における頂上事象の発生確率 (緊急遮断弁が作動しない場合)

図-29に示す。「施設管理者により実施可能な対策」および「管理体制を強化する対策」を実施することにより、頂上事象の発生確率は、震度6弱では0.07、震度6強では0.31、震度7では0.90となった。これにより、震度6強以下の震災であれば、施設管理者の対応行動による災害対応がおおむね遂行できるものと考えられる。しかし、震度7の震災となれば、ほぼ確実に施設管理者による災害対応行動は支障をきたすものと考えられる。

以上の結果から、対策を適切に講じることができれば、緊急遮断弁が作動しない場合でも、震度6強までの震災に対応することができる。震度7の震災時に備えた対策としては、当面のところ、緊急遮断弁の震災時における信頼性を向上させることが挙げられる。

4.2.8 パイプライン施設における大規模地震対策の提案

(1) 管理システムにおける対策の提案

実際に施設管理の現場において対策を実施する場合は、表-6に挙げた対策をさらに具体的な内容にしていく必要がある。そのため、4.1.8項において述べた対策検討FTAを実施して、その結果得られた具体的な対策を図-30に示す。ここでは主に、通水停止を行う各種設備の操作と水管理システムにおける観測機器に関わる対策が考えられた。

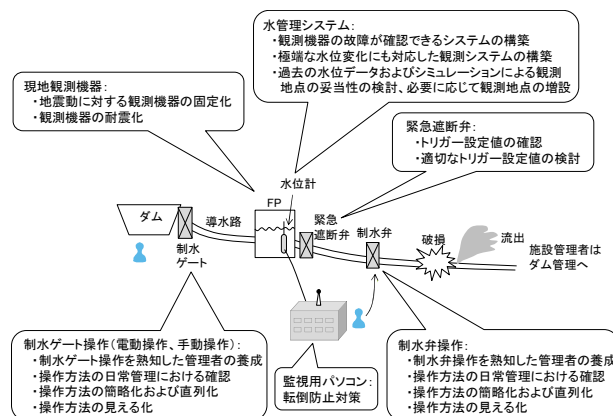


図-30 管理システムにおける対策

(2) 管理体制における対策の提案

本研究における災害対応に関するリスク解析から、大規模地震時に備えた管理体制について、図-31に示す次のような対策が考えられた。

① 施設管理設備に熟知した管理者の養成

通常時の施設管理者の被災に備えて、他の職員でも災害対応が遂行できるような体制を備えておくことが必要である。そこで、通水停止に関わる各種設備機器の操作に熟知した職員を養成する。

② 施設管理者と受益者の連携体制の構築

Mパイプラインの施設管理者は、ダムとパイプラインを管理しており、地震発生時にはダム管理に多くの人員が割かれることになる。また、面的な広がりをもつパイプラインの全域を少数の施設管理者のみで対応することは現実に困難である。そのため、施設管理者は受益者に状況確認を依頼するなどの連携体制を構築する必要がある。

③ 車両の使用体制の構築

パイプライン施設の複数個所で同時多発的な被害を受けた場合に現地へ急行する車両が不足するおそれがある。そのため、行政の他部署も含めた震災時におけ

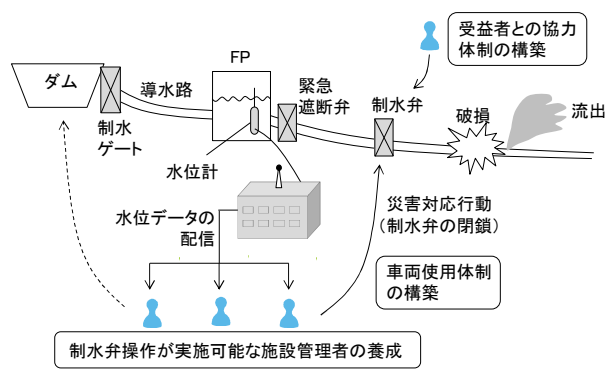


図-31 管理体制における対策

る車両の使用体制を構築しておくことが必要である。

(3) 本研究において提案する対策のまとめ

以上に記した管理システムおよび管理体制における対策には重複部分があることから、あらためて表-9に対策を取りまとめる。ただし、これ以上の対策内容の具体化は、現場の状況に応じて行うことになる。

4.2.9 パイプライン施設に関するまとめ

本研究では、大規模地震時における災害対応の遂行を阻害する原因に対して、施設管理者が経費をかけずに実施できる対策の効果をFTA手法により評価した。その主要な結果を次にまとめる。

- 1) 対策を実施していない現状の場合、震度6強以下の震災であれば、施設被災時に通水停止を行う災害対応がおおむね支障なく遂行できる。しかし、震度7の震災であれば、その災害対応が遂行不能になるおそれがある。
- 2) 対策を実施すれば、通水を停止する災害対応が阻害される確率は、震度7の震災時でも0.5を下回ることが示された。
- 3) ただし、以上の評価には緊急遮断弁による効果が大きく寄与している。対策を適切に実施すれば、

表-9 パイプラインの施設管理において実施可能な対策（本研究において提案する対策）

対策	項目	内容
ヒューマンエラー対策	施設管理における確認	制水弁および制水ゲートの操作方法や位置の確認を日常管理において実施する。
	操作手順の簡略化・直列化	制水弁および制水ゲート操作方法の簡略化および直列化を検討する。
	見える化	制水弁および制水ゲート操作方法を図示するなど明確に確認できるようにする。 現地の制水弁の位置が迷わず分かるように目印を付ける。
観測機器の破損防止対策	転倒防止	事務所内の監視用パソコンやモニターなどの転倒防止対策を実施する。 現地観測機器の転倒防止対策を実施する。
	故障防止	現地観測機器の耐震性の確認および振動による故障の防止対策を実施する。
信頼性の確認	設定値の適正化	緊急遮断弁が動作を開始する設定値の適正を確認および検討する。
水管理システムの強化	水位の誤表示の解消	観測機器が故障したことがデータ表示により確認できるしくみを構築する。 極端な水位変化が生じて正しい水位が観測できるシステムを構築する。
	水位観測の精度向上	過去の水位データおよびシミュレーションにより現状の水位観測の妥当性の確認する。 その結果、観測地点数に不足があれば、その適切な配置検討と増設を行う。
管理体制に関する対策	施設管理者の養成	通常の施設管理者が被災しても、他の施設管理者により災害対応が遂行できるように、 各施設管理設備の操作に熟知した管理者を養成する。
	対応人員の不足	人員不足を補うために、受益者を含めた管理体制を構築する。
	緊急車両の不足	緊急時の車両使用について行政機関の他部署との連携体制を構築する。

緊急遮断弁が作動しない場合でも、震度 6 強までの震災に対応することができる。しかし、震度 7 の震災時に、万一緊急遮断弁が作動せず、施設管理者の対応行動により通水を停止しなければならない事態となれば、その災害対応はほぼ確実に遂行不能になる。

- 4) 以上の結果から、表-9 に示した対策を講じる計画策定は有意義であるが、震度 7 の震災時に備えては、地震時における緊急遮断弁の信頼性を向上させる必要がある。

5. おわりに

本研究において実施したように、FTA を災害対応計画の策定手段として用いることで、これまで施設管理者が経験的かつ感覚的に考察してきた大規模地震時の被害リスクや対策を定量的に議論することができる。これにより、災害対応計画のみなおしや BCP の策定に際して、大規模地震対策を検討する現場の施設管理者の意思決定を支援することができるものと考えられる。ただし、FTA により得られた結果の妥当性を客観的に確認する方法は確立されていない。それゆえ、今後も、施設管理現場の状況に応じて、本研究で得られた FT 図を修正し、対策評価の精度を向上させていく作業が必要である。

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) 谷 茂：中山間地域における総合防災システムについて、農業土木学会誌、73(8)、pp.25-28、2005。
- 11) 井上敬資、谷 茂、片山敏孝、金井昌信、新保博英、石垣広男：氾濫解析を活用したため池防災情報システムの構築、農業農村工学会誌、77(11)、pp.7-10、2009。
- 12) 静間俊郎、中嶋 勇：農業水利施設の地震リスクマネジメント、H23 農業農村工学会大会講演会講演要旨集[企-3-5]、2011。
- 13) 浅野 勇：農業水利施設群を対象とした地震リスク評価手法、農村工学研究所技報、214、pp.221-240、2013。
- 14) 内閣府防災担当：事業継続ガイドラインーあらゆる危機

- 的事象を乗り越えるための戦略と対応一、pp.3-4、2013.
- 15) 例えば、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)、2012.
 - 16) 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.
 - 17) 徳島県：徳島県土地改良区BCPマニュアル、2013.
 - 18) 農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室：土地改良施設管理者のための業務継続計画（BCP）策定マニュアル、2016.
 - 19) 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.12-16、2005.
 - 20) 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、290、pp.33-42、2014.
 - 21) 大久保 天、本村由紀央、中村和正：基幹的な灌漑用水路における大規模地震災害に備えた災害対応力強化対策の評価、農業農村工学会論文集、No.302(84-2)、pp.I_121-I_130、2016.
 - 22) 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.2-3、2007.
 - 23) 貝戸清之、金治英貞、小林 寛、間嶋信博、大石秀雄、松岡弘大：目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法、土木学会論文集 F4（建設マネジメント）、67(2)、pp.74-91、2011.
 - 24) 田中義光、山元 弘：河川ポンプ設備の経済性と信頼性を考慮したマネジメント手法、土木技術資料、50(11)、pp.34-37、2008.
 - 25) 能島暢呂、亀田弘行：地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系リスク評価法、土木学会論文集、No.507、I-30、pp.231-241、1995.
 - 26) 亀田弘行、岩井 哲、北原昭男、能島暢呂：都市震害のシステム分析序論、京都大学防災研究所年報、第31号、B-2、pp.67-91、1988.
 - 27) 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.
 - 28) 気象庁：気象庁震度階級の解説、p.2、2009.
 - 29) 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、pp.61-105、2011.
 - 30) 東京都：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）、入手先く <http://www.busai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>、参照 2016.3.17、2012.
 - 31) 札幌市：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）、入手先く http://www.city.sapporo.jp/kikikanri/daisannjijisinnhigaisoutei/daisannjijisinnhigaisoutei_index.html、参照 2016.3.17、2014.
 - 32) 橋本邦衛：安全人間工学、中央労働災害防止協会、pp.93-95、2009.
 - 33) 小川信行：水道管路の被害と地震時動水圧、国立防災科学技術センター研究報告、第15号、pp.57-73、1976.

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)

Author : NAKAMURA Kazumasa, OHKUBO Takashi and TATEISHI Shinji

Abstract : Many agricultural irrigation facilities have been damaged in Japan in large-scale earthquake disasters, such as the Great East Japan Earthquake of 2011. There is an urgent need to make major agricultural irrigation facilities more resistant to the effects of large-scale earthquakes. In this study, toward proposing large-scale earthquake countermeasures related to the management and control systems of agricultural irrigation facilities, we identified the factors that inhibit disaster responses by facility managers at times of large-scale earthquakes, and we assessed the effectiveness of countermeasures that address those factors. The facilities examined were large-scale open channels and high pressure pipeline facilities, which are common agricultural facilities in Hokkaido. Fault tree analysis (FTA), a method of analysing reliability, was used. The following are the results of the analysis.

- (1) The managers of large-scale open channel facilities consider that intake gates should be closed immediately after an earthquake occurs, in order to prevent secondary disasters caused by damage to the facilities. - Twenty four causal factors that inhibit disaster responses by facility managers were identified. It is thought that 11 of these 24 factors could be addressed by countermeasures at the facility management sites. - It was found that, by taking the identified countermeasures, the intake gates could be closed without any hindrances at the time of earthquakes measuring up to "6-upper" on the Japanese scale of seismic intensity. However, it was found that, by taking only the identified measures, the intake gates could not be closed at the time of earthquakes measuring "7" on the Japanese scale of seismic intensity. The study results demonstrate that the identified measures are effective and meaningful. Meanwhile, the need for alternative means of closing the intake gate was suggested, in consideration of cases in which gate closure would be otherwise impossible.
- (2) The managers of pipeline facilities expect that emergency shut-off valves will close and that water intake will stop when water leakage from damaged facilities occurs at the time of an earthquake. However, when the emergency shut-off valve can no longer operate, the facility manager needs to take emergency disaster responses to stop water intake. Twenty eight factors inhibiting the disaster responses of pipeline facility managers were identified. It was thought that 12 of these factors could be addressed by countermeasures taken at the facility management sites. It was suggested that if countermeasures addressing those 12 factors were taken, the facility managers would be able to respond to earthquakes measuring up to "6-upper" on the Japanese scale of seismic intensity, even if the emergency shut-off valve were inoperable. However, it was also suggested that there is a low likelihood of stopping the water if the emergency shut-off valve could no longer operate at the occurrence of an earthquake measuring "7" on the Japanese scale of seismic intensity. The study results demonstrate that the identified measures are effective and meaningful. Furthermore, it was suggested that the functional reliability of the emergency shut-off valve at earthquake occurrence needs to be improved.

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