

水道の地震対策とその評価

Estimation of Earthquake Resistant Measures of Water Supply System

細井由彦^{*}, 城戸由能^{**}, 喜多秀行^{***}, 山内 豊^{***}

By Yoshihiko HOSOI, Yoshinobu KIDO, Hideyuki KITA and Yutaka YAMAUCHI

After the great Hanshin Awaji earthquake, plans of earthquake resistant water supply system have been presented in water works. For example, Kobe city made " Plan of quake-resistant water supply system" on the basis of their experience of damages and restoration of its water supply system. In those plans, various measures were included. In this paper the feature and effect of those measures were examined. They were examined from the point of effect on restoration and emergency supply, and feasibility. Next, they were overviewed on the fault tree diagram. Finally a case study was carried out according to some of the measurers.

Keywords: Earthquake resistant measures, Emergency water supply, Fault tree analysis, Restoration of water suply system, Water works

1. はじめに

阪神・淡路大震災を教訓として、水道の地震対策を見直したり、新たに策定することが行われている。神戸市や西宮市をはじめとして、詳細で具体的な計画がまとめられている例も多い。それらの計画の中には、それぞれの水道の事情に応じて、ハード面の強化からソフト面の整備まで種々の方策が組み込まれている。方策は多岐にわたり、その費用も効果も様々である。計画を実行していく上での選択順位も、費用の制約の中でより効果の高いもの、重複の少ないものから選ばれていくことが重要であると考えられる。

そこで本研究では、個々の地震対策の特徴を多角的に整理し、全体の中における位置づけを明らかにすることを試みた。さらにハード面の強化について

取り上げ、その効果を実際のシステムについて検討してみた。

2. 各種の対策とその特徴

各種の報告書等¹⁾²⁾³⁾を参考に水道の地震対策として提案されている項目を取り上げた。これらの対策を以下に示す3通りの方法でその特徴を検討してみた。

1) 水道システム図で見た対策の相互関係

水道システムと各対策の関係を示したものが図-1である。水道は取水から給水までの各サブシステムの直列システムとして構成されている。地震対策は、システム要素を強化してフローの機能を強化することを目的とするものと、それを補うためのストック機能の整備に関するものに分けられる。前者としては、各施設の耐震化や冗長性の向上があげられる。後者には、貯水機能付き送水管の設置や、配水池の容量増、緊急遮断弁の設置、耐震貯水槽をはじめとする貯水設備の整備などがある。

これらの水道システム自身に対する対策は、事前の備えであるのに対し、地震発生後の事後の体制の

*キーワード：地震対策・応急給水・応急復旧・フォールトツリーアナリシス・水道

** 正会員 工博 鳥取大学工学部社会開発システム工学科
鳥取市湖山町南4 TEL 0857 31 3550 FAX 0857 31 0882

***正会員 工修 中央開発株式会社

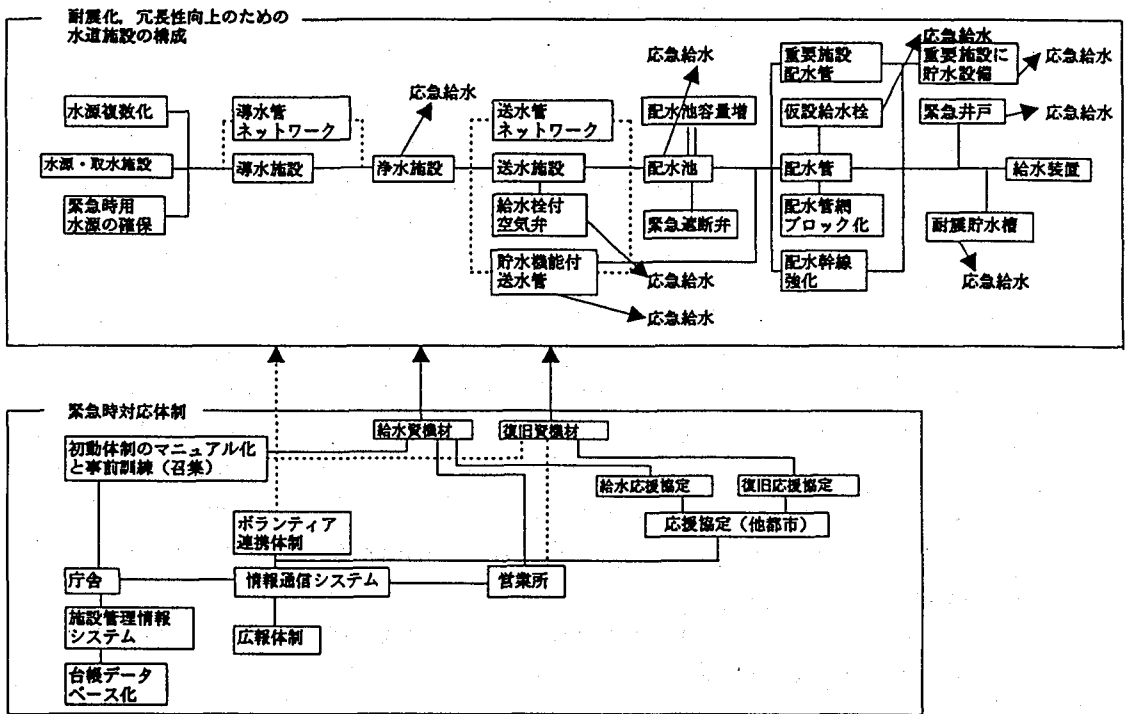


図-1 水道システムの中で見た地震対策

整備に関する対策もある。給水資機材や情報システムの整備は、給水を行う側と受ける側の関係を円滑にするものと位置づけることができる。これらを補うものとして応援協定がある。復旧についても、その迅速化を図るために、資機材の備蓄と、活動支援のための応援協定の締結が対策として考えられている。

図-2はこれらの対策の関係を示したものである。耐震力の指標としてここでは断水日数を用いている。フローの強化が最も根本的であるが、時間と費用の制約の中では完全とすることはあり得ない。それを補うために、フローの強化に比較して、少ない費用と時間で行うことができる、復旧能力の強化が図られる。しかし、復旧能力の強化には限界があり、いくら強化してもシステムの被災がゼロのときと同じ状態(被災後瞬時に復旧できる)にする事はできない。そのためにストックの整備と給水活動力を含めた、応急給水能力で対応することになる。

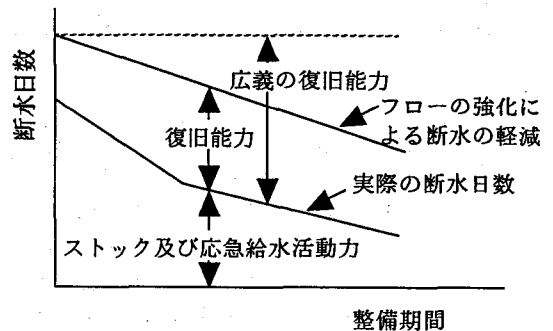


図-2 フロー、ストック、復旧能力の整備の関係

水道の地震対策は、想定震度に対し最大断水日数を設定したならば、費用及び整備期間を考慮して、図-2に示されるように、各時期までにフローやストック能力、応急対応力をどのように組み合わせるかをまず決定する。それに応じて、実施すべき対策とその内容を決定していくことが、合理的で効果的な整備を進める上で重要である。

表-1 各種地震対策とその特徴

	応急給水				応急復旧				費用	時間	現実性	
	供給水源	供給拠点	供給資材	供給活動	調査用水	調査活動	復旧活動	復旧資材				
1 浄水場耐震化	A,B				A				大	中	大	
2 導水管耐震化	A				A				大	長	大	
3 導水管ネットワーク	A				A				中	中	大	
4 水源復元化	A				A				大	長	大	水利権等の問題有り
5 送水管耐震化	A				A				大	長	大	
6 送水管ネットワーク	A				A				中	中	大	
7 貯水機能付き送水管	A,B				A				中	中	大	浄水場から配水地域までの距離で優劣が生じる
8 配水池耐震化	B				A				中	中	大	
9 配水池容量増	B								中	中	大	
10 配水池緊急遮断弁	B								小	短	大	震度を感じたり、流出流量が急増すると稼働
11 耐震貯水槽	C								中	中	大	配水管網内に設置。地震時には遮断され貯水
12 配水幹線耐震力強化	D				D	D			大	中	大	人口密度の高いところほど有効
13 重要施設配水管耐震化	D					D			中	中	中	避難所、病院、福祉施設等への配水管
14 配水管網ブロック化					E	E			中	中	中	
15 配水管耐震化						D			大	長	大	人口密度の高いところほど有効
16 給水栓付空気弁	B								小	短	大	送配水管の空気弁に給水栓をとりつけておく
17 仮設給水栓設備整備	C								小	短	大	
18 給水資機材備蓄			CF						中	短	大	仮設水槽やポリ容器など
19 給水タンク車整備	C		C						小	短	大	
20 給水応援協定	C	FJ	GJ						小	短	中	
21 給水装置耐震化						D			大	長	中	家庭での使用に直接関与
22 浄水装置整備	H								中	短	大	プールの水を飲料水とする
23 重要施設に貯水設備	B								中	短	大	病院、学校などの公共施設に貯水設備を設置
24 復旧資機材備蓄						I	I		中	短	大	大翌、多量になると備蓄の場所も問題になる
25 復旧応援協定					GJ	GJ	IJ		小	短	中	
26 情報通信システム				K	K	K			中	中	中	被災情報発信、応援の依頼、給水復旧活動支援など
27 施設管理情報システム				EK	K				中	短	中	浄水場、送配水管などの水量、水圧情報を収集管理
28 台帳データベース化					J	J			中	中	大	分散保管することも必要
29 広報体制				JK		K			小	短	中	住民に対する情報提供のシステム
30 ボランティア連携体制				GK					小	短	小	
31 庁舎・営業所等耐震化				L	L	L			中	中	小	
32 応援受入体制整備				L	L	L			小	短	中	宿泊、食事、活動のための地理案内等も必要
33 地域コミュニティ形成				F,G,K					小	中	中	高齢者が多いところでは特に重要
34 非常訓練(事業体)				J	J	J			小	短	中	
35 非常訓練(住民)				J					小	中	中	
A: 上位レベルの機能維持				E: 水運用					I: 機械・材料・車等			
B: 運搬・給水拠点、貯留				F: 受水を援助					J: 事前情報			
C: 給水拠点増				G: 人員					K: 事後情報			
D: 下位レベルの機能維持				H: 代替水源					L: 体制整備			

2) マトリックス表示による対策の特性

巨大地震による断水日数をゼロにすることは現実的ではないので、図-2を別の角度から見れば、地震対策は応急給水及び復旧能力の整備と見ることが出来る。すなわち図中で「広義の復旧能力」と記しているが、フローの強化も復旧と応急給水能力の整備対策であると考えられる。そこで、応急給水と応急復旧の面から、個々の対策の特徴をさらに詳しく検討してみる。

応急給水を可能にする要素を列挙すると、まず給水のための水を確保する水源が必要になる。被災当初はこれはストック機能で対応するが、フローの回復が進むにつれそちらに移行する。第2に利用者に対する給水拠点が必要である。利用者の利便を考えればできる限り拠点は多い方が好ましい。施設の復旧が進んでいない場合には、給水車が最も有効な拠

点形成機材となる。第3には給水のための資機材に関するもの、さらに給水活動を支援するものの4つが考えられる。

一方復旧については、調査用水、調査活動、復旧活動、復旧用資機材等の要素に区分できる。調査用水とは、管内に水を張り漏水を見つけることによって破損箇所を特定していくための水である。したがって調査用水は調査箇所の上流より管路で有圧で流れてくる必要がある。応急給水のようにタンク車では供給できない。阪神淡路大震災の被害を受けた神戸市ではこの水が不足したために、復旧に重大な支障をきたした。

対策項目を以上のような要素に区別して特徴を整理したものが表-1である。表中の「上位レベル」と「下位レベル」は、それぞれ配水池から上流側と下流側を示している。

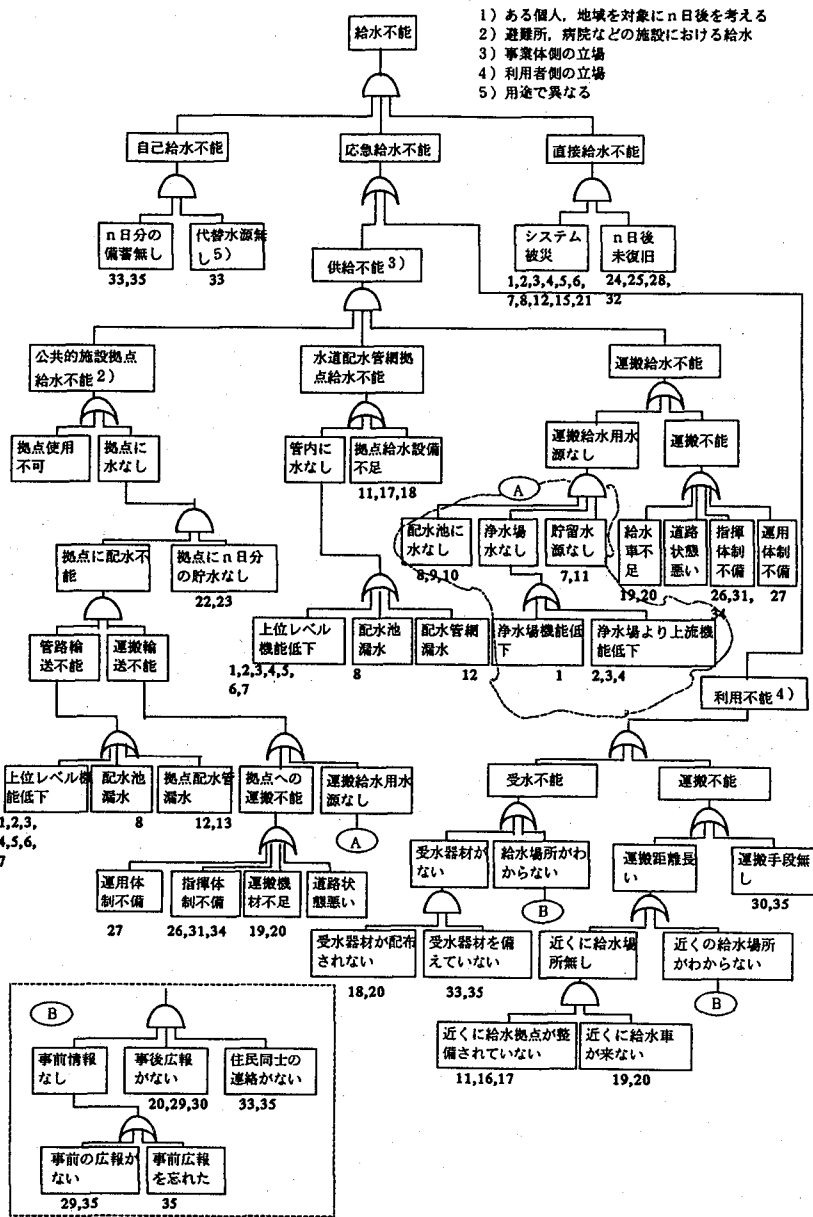


図-3 給水不能に陥る場合のフォールトツリー図

導送配水管や浄水場、配水池の耐震化は応急給水や復旧調査用の水の確保に効果を発揮する。配水管関係の強化は応急給水時の供給拠点の設置や復旧時の負担の軽減化に有効である。

給水応援協定は給水タンク車を増やして応急給水

の拠点を増やすことが期待できる他、給水資材の供給、供給活動に対する人員面からの支援、事前に情報を交換しておくことにより活動の円滑化を図ることができる。情報通信システムの整備により、事後情報を流すことで、各種の活動を支援することが可

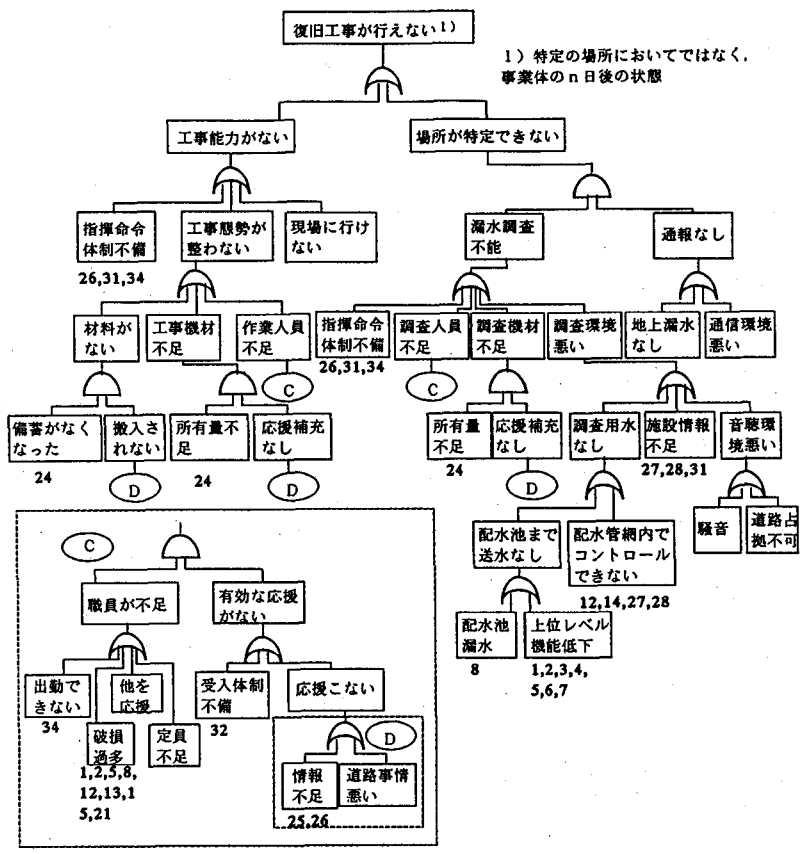


図-4 復旧不能に陥る場合のフォールトツリー図

能になる。

1) でも述べたように、一般にハード面の整備は費用や時間がかかるが、確実性は高い。一方、応援協定や情報関係の整備は、比較的短時間で低費用で進めることができ、多方面に効果を発揮することが期待されるが、他の諸々の要因とも関係があり、確実さを定量的に明示することはできない。

対策を進めるにあたっては表中で特徴を示す符号が、応急給水、応急復旧の各要素列に分散し、いずれの要素も欠けることがないように、個々の単位対策をバランスよく、組み合わせるように選択していくことが必要である。

3) フォールトツリーによる検討

具体的な目的に対し、考慮するべきことをより明確にするために、フォールトツリーを用いた整理を行ってみる。応急給水ができなくなる要因に展開し

たフォールトツリーを図-3に示す。地震後の給水方法として、消費者自身による自己給水と、給水栓からの直接給水、その中間の応急給水の3段階が考えられる。それぞれの戦略として、地震後の時間経過にしたがってどの方法を採用するかを決定したならば、少なくともそれまでに解決しておくべきことが、下の事象より明らかになる。

応急給水が不能になる原因として、事業者側が給水を行えない場合と、それを受ける利用者側が受水できない場合がORゲートでつながれており、そのいずれかが発生することによる。応急給水の方法として、本図では公共施設における拠点給水と、配水管に給水拠点を設ける方法、そして給水車による運搬給水の3つを考えている。これらはANDゲートで結ばれており、3つの全ての方法が行えないときに、供給不能の事態が発生する。したがって地震直後か

表-2 上位事象と対策の関係

公共的施設拠点 給水不能	$\{1^+ \cdot 2^+ \cdot 3^+ \cdot 4^+ \cdot 5^+ \cdot 6^+ \cdot 7^+ \cdot 8^+ \cdot 12^+ \cdot 13^+\} \cdot \{(1^+ \cdot 2^+ \cdot 3^+ \cdot 4^+) \cdot 7^+ \cdot 8^+ \cdot 9^+ \cdot 10^+ \cdot 11^+ + 9^+ \cdot 20^* + 26^* \cdot 31^+ \cdot 34^* + 27^*\} \cdot \{22^+\} \cdot \{23^+\}$
水道配水管網拠点 給水不能	$1^+ \cdot 2^+ \cdot 3^+ \cdot 4^+ \cdot 5^+ \cdot 6^+ \cdot 7^+ \cdot 8^+ \cdot 12^+ \cdot 11^+ \cdot 17^+ \cdot 18^+$
運搬給水不能	$(1^+ \cdot 2^+ \cdot 3^+ \cdot 4^+) \cdot 7^+ \cdot 8^+ \cdot 9^+ \cdot 10^+ \cdot 11^+ \cdot 19^+ \cdot 20^* + 27^* + 26^* \cdot 31^+ \cdot 34^+$
復旧工事能力なし	$26^* \cdot 31^+ \cdot 34^* + 24^+ \cdot 25^* \cdot 26^* + (1^+ \cdot 2^+ \cdot 5^+ \cdot 8^+ \cdot 12^+ \cdot 13^+ \cdot 15^+ \cdot 21^* + 34^*) \cdot (25^* \cdot 26^* + 32^*)$
破損箇所特定不能	$26^* \cdot 31^+ \cdot 34^* + (1^+ \cdot 2^+ \cdot 5^+ \cdot 8^+ \cdot 12^+ \cdot 13^+ \cdot 15^+ \cdot 21^* + 34^*) \cdot (25^* \cdot 26^* + 32^*) + 24^+ \cdot 25^* \cdot 26^* + 1^+ \cdot 2^+ \cdot 3^+ \cdot 4^+ \cdot 5^+ \cdot 6^+ \cdot 7^+ \cdot 8^+ \cdot 27^* \cdot 28^+ \cdot (12^+ \cdot 14^* + 31^+)$
+は和集合演算, ・は積集合演算を示す。2本下線, 1本下線, 下線無しは順に費用の大きいものから小さいものを示す。肩付きの+, *, 肩付き無しはそれぞれ確実性の大, 中, 小を示す。	

ら完全復旧までの間、これらのうちのいずれかが実施できるように、対策を行うことが求められる。

その中の1つである公共的施設を拠点として給水を行うことを考えてみると、これが不可能になるのは、拠点施設が破壊されて使用できなくなるか、そこに水がないかの、いずれかが発生するときである。水道事業が対応できるのは後者のみであるが、そちらの対策をいくら行っても、前者の施設の破壊が発生してしまうと、「公共的施設拠点給水不能」事象が発生してしまう。したがって拠点到水がなくなることの無いようにすると同時に、同じくらいの確かさで拠点の耐震力が必要とされる。

さらに拠点到水がない状態が発生する要因とし

て、拠点までの管路輸送が不能、運搬輸送も不能、拠点到水も無しとの3つの状態が、ANDゲートで結ばれている。まず拠点までの管路輸送が復旧するまでの間は、そこまでの運搬輸送が可能になるように整備を行い、その運搬輸送ができるようになるまでの貯水施設の整備を考えなければならない。

表-1の各対策が、FT図のそれぞれのどのような事象を回避するために有効であるかを示すために、図中に対策の番号を付した。ブール代数演算を行い対策の選択を行う目安を示したものが表-2である。

先に述べたように、公共的施設を拠点とした給水を行う場合には、水道事業体の関係する事象として

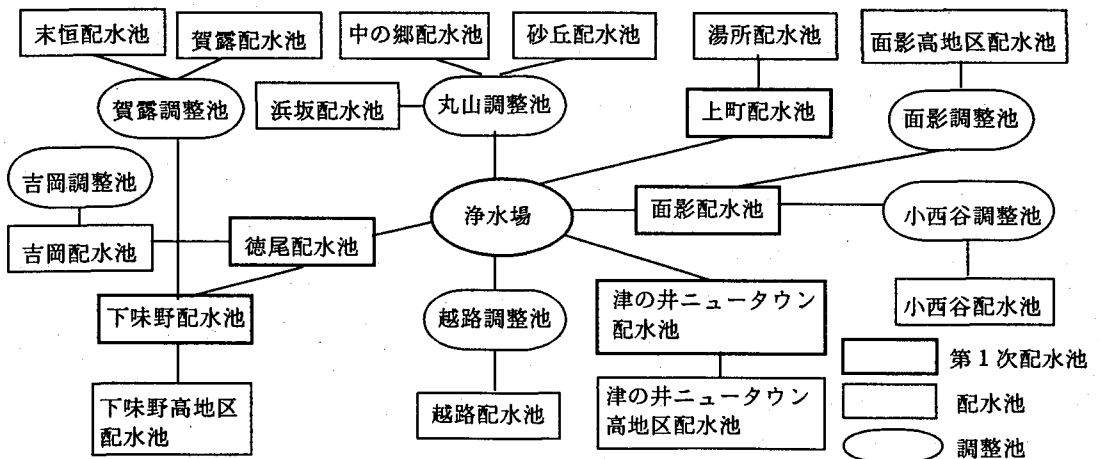


図-5 事例分析に取り上げた水道システム

は、公共施設までの管路による配水が不能、運搬による給水不能、施設における貯留水がないの全てのことが発生したときに給水不能に陥る。表-2においては、{} で囲まれる4つの単位対策群がいずれも行われていない場合に、不能に陥る可能性がある。先に言えば、ひとまずいずれかの対策が行われていれば、上の事象は回避しうることを示している。ここに示されている4つの{} で表現されている対策は、施設までの配水機能の強化、浄水場や配水池の耐震強化を行いそこから運搬する方法、拠点自身で独立して水を確保する方法である。各事業体の施設整備状況により異なるが、22や23のような拠点施設における浄水装置や貯水施設の設置が、比較的低費用、短期間で確実性が高い。

図-4には復旧に関するフォールトツリーを示す。これをもとにしたフォールト事象とそれに対する対策の関係も表-2に示す。「復旧工事が行えない」というトップ事象に対し、全てORゲートでつながっている事象を下っていくと、「指揮命令体制不備」という事象にたどり着く。すなわちこの事象が発生すると、必ずトップ事象が発生することになり、指揮命令系統を整えておくことは、それに代わるものが無く、効率的な復旧工事のためには欠くことができないものと言える。

3. 管路を中心とした耐震化の効果に関する事例分析

前章では地震対策の特徴を種々の角度から整理し、整備を進める上での対策の選択とその順序を決定する際の参考とした。ここでは、管路の耐震化に的を絞る、それにより利用者までの運搬距離がどのように改善されるか、具体例により定量的な検討を行う。

1) 対象とした水道

事例による検討の対象として鳥取市の水道を取り上げた。鳥取市の水道システムは図-5に示すように、1つの浄水場と、5カ所の第1次配水池、6カ所の調整池と12カ所の第2次配水池により構成されている。給水人口は約15万人である。

給水区域を2kmのメッシュに区切り、それぞれのメッシュ内の人口を求め、その人口がメッシュの中

心に集中しているものとして、運搬距離の計算を行った。

2) 考慮した耐震化対策

ストックの整備として、浄水場のみが耐震化された場合、第1次配水池が耐震化された場合、容量500m³以上の池が全て耐震化された場合、全ての配水池及び調整池が耐震化された場合を考えた。またフローの整備として送水管を耐震化し、それに2kmおきに給水栓付き空気弁を計17箇所設置する場合と、中学校を拠点として、全中学校までの配水施設を耐震化した場合を考えた。ただし中学校11校だけでは、受け持つ人口に極端な偏りが生じるので、小学校5校と高等学校1校を加え、計17校とした。

3) 対策の効果

対策を行うことにより、応急給水の水源と利用者までの距離がどのように変化するかを図-6に示す。浄水場を水源とする場合には、給水人口の半分以上が4km以上離れており、給水タンク車の大量整備が是非必要である。第1次配水池の5池を耐震化する事により状況は格段に改善され、約半数が水源から2km以内となる。容量が500m³以上の配水池を耐震化すると、約7割が水源から2km以内になる。

給水栓付き空気弁の配置や中学校を中心とする拠点校までの耐震化を行うと、2km以内の人口は全体の約9割とすることができる。

図-7には確保水量と平均距離との関係を示している。連続給水が可能な場合も示せるように水量については逆数をとっている。容量が500m³以上の配水池を耐震化した場合と、全ての配水池及び調整池を耐震化した場合を比較すると、距離は改善されるが、総確保水量はほとんど差がない。このことは全池を耐震化したとえ運搬距離が改善されたとしても、容量が十分でない池が存在することを示している。実際最悪の場合1人あたり0.4Lしか確保できないところが現れる。したがって、ストック機能として利用するのならば、本事例の場合耐震化は、第1次配水池か、容量500m³以上の配水池までにとどめるべきである。しかし、送水施設等のフロー機能を強化して、これらの配水池や調整池を給水拠点として利用するのは、学校までの配水管を耐震化するのに比較して、低費用で効果的であるといえる。

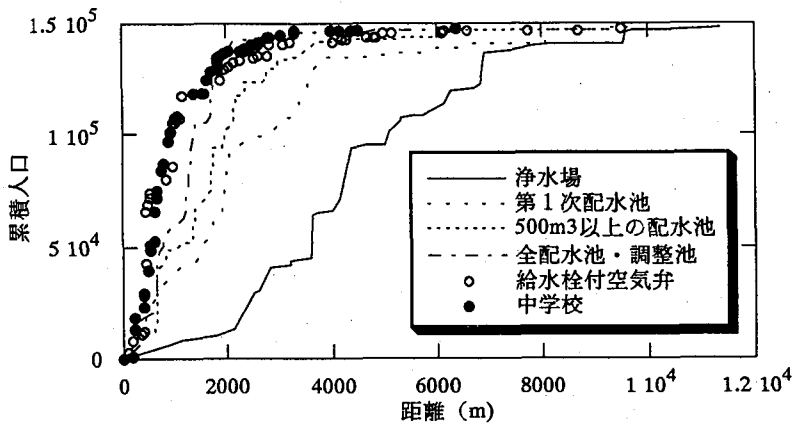


図-6 耐震化対策後の水源と利用者間の距離

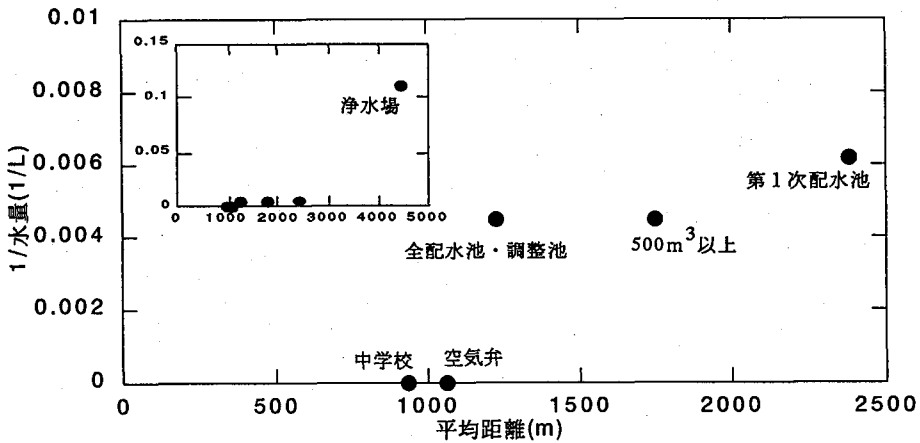


図-7 平均距離と確保水量

4. あとがき

本研究では、水道の地震対策を構成する各種の単位対策の特徴と、相互の関係、それらの全体のシステムの中における位置づけなどについて、多面的な観点から整理することにより、これから地震対策を進めていく場合の基本的検討に資することを試みた。とくに水道システムのハード面をフローとストックの両機能に区別し、それらの耐震化の相互関係や、復旧対策、給水対策との関係を明らかにした。

事例として鳥取市の水道を取り上げ、種々の耐震

化対策により応急給水のための距離がいかに改善されるかを検討した。

参考文献

- 1) 神戸市水道復興計画検討委員会：神戸市水道耐震化指針，平成7年6月。
- 2) 大阪市水道局：大阪市水道・震災対策プラン21，平成8年3月。
- 3) 大阪府水道地震対策調査委員会：大阪府水道地震対策基本方策，平成8年9月。