

応急給水と復旧過程から見た水道の 各種地震対策の評価

細井由彦¹・城戸由能²

¹正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目)

²正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

水道の地震対策のための方策は広範囲にわたっており、費用や効果も都市の現状に応じてさまざまであり、厳密な検討を行うためには、それぞれの給水区域において各対策ごとのシミュレーションを行う必要がある。本研究では、給水区域の特性と種々の地震対策をできるだけ簡単なパラメータで与え、ハードからソフトまで種々の地震対策の効果を簡便に把握することのできる一般性を持ったシミュレーションモデルを検討した。さらに給水を受ける住民側の状況も考慮に入れて地震対策を評価することを試みた。その結果、各種施設の耐震化や応援協定、交通対策など幅広い対策を、住民の満足度という尺度で統一的に評価することができた。

Key Words : earthquake resistant measures, emergency water supply, water supply reliability

1. 緒言

平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災においては、水道施設が大きな被害を受け、住民の生活に多大な影響を及ぼすこととなり、改めてライフラインとしての水道の重要性が認識された。地震被災後の生活の回復に水道の復旧は重要な要因となっている。したがって事前に地震被災後の水道の応急給水や復旧対策を検討しておく必要がある。阪神淡路大震災で被災した神戸市等において新たな耐震化対策が作成されている^{1),2),3)}。

地震時の水道システムの信頼性や復旧の予測についてはこれまでも種々研究が行われてきている。磯山・片山⁴⁾は大規模水道システムのとくに送配水管網の地震後の機能評価を、埋設管の被害率と被災後の配水調整供給戦略をもとに行っている。シミュレーションを繰り返すことにより、各地域における需要水量が満たされる確率で、信頼度を評価している。星谷・小池・宮崎⁵⁾は、上水道管路の地震後の構造的な復旧過程と、それにもなう機能的な復旧過程を予測するモデルを提案している。リンクの構造的な破壊状態を、完全破壊から平常状態まで離散的な段階を設けて表現し、機能評価を給水可能な人

口の割合で行っている。星谷・宮崎⁶⁾は復旧を重要拠点を優先する集中給水計画、できるだけ広く給水する拡散給水計画、逐次的に水供給の回復が最も速いところから復旧を行っていく方法の3つの戦略について、復旧状態の予測を行っている。以上のような、かなり現実的で複雑なシステムの信頼性を評価する研究では、基本的な考え方を示した後、事例を取り上げシミュレーションを行っていく方法がとられている。

川上^{7),8),9)}は基礎的な検討が可能な単純なネットワークを取り上げ、一般的な検討を行っている。とくにシステム要素の物理的な破壊確率と、システムの形状の関数を考えることによりシステムの信頼性を評価するという、独自の理論的な検討を進めている。能島・亀田も、シミュレーションを用いずに、川上よりもマクロにライフラインの特性を考慮して、震災後の復旧戦略に関する理論的な検討を行っている^{10),11)}。

大野らは上水道以外のライフラインの影響や、上水道の復旧に関する種々の要因を組み込んでシミュレーションを行い、機能復旧過程の検討を行っている^{12),13)}。

これらの研究では上水道システムの形状、とくに

表-1 水道の地震対策とその特徴

	応急給水				応急復旧				費用	時間	確実性
	水源	給水拠点	給水資材	給水活動	調査用水	調査活動	復旧活動	復旧資材			
浄水場耐震化	A B				A				大	中	大
導水管耐震化	A				A				大	長	大
送水管耐震化	A				A				大	長	大
水源複数化	A				A				大	長	大
貯水機能付き送水管	A B				A				中	中	大
配水池耐震化	B				A				中	中	大
配水池容量増	B								中	中	大
配水池緊急遮断弁	B								小	短	大
耐震貯水槽		C							中	中	大
配水幹線耐震化		D			D				大	中	大
重要施設配水管耐震化		D							中	中	大
配水管網ブロック化						F	E		中	中	中
配水管耐震化							D		大	長	大
給水資機材備蓄			C F						中	短	大
給水タンク車整備		C							小	短	大
給水応援協定		C	F J	G J					小	短	中
浄水装置整備		H							中	短	大
重要施設に貯水設備		B							中	短	大
復旧資機材備蓄							I		中	短	大
復旧応援協定						G J	G J	I J	小	短	中
情報通信システム				K		K	K		中	中	中
施設管理情報システム				E K		K	K		中	短	中
台帳データベース化						J	J		中	中	大
広報体制				J K			K		小	短	中
応援受け入れ体制整備				L		L	L		小	短	中

A:上位レベルの機能維持 E:水運用 I:機材、車等
 B:運搬、給水拠点 貯留 F:受水援助 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

配水管網を中心とした地震時の信頼性の評価や、復旧戦略の検討に有益な示唆を与えている。しかしこれらの研究における取り扱い、送配水幹線網の破損確率、復旧度合い、破損を残した状態での配水戦略を考慮し、給水量の需要量に対する割合で機能評価を行うものが中心である。したがって送配水管網以外に対する対策や、とくにハードな耐震化以外についての評価は行いにくい。また最終的な評価指標が通水率や給水量となっている。これは水道事業体から見れば最も重要な指標であることは間違いないが、住民の立場で見た場合には、水の運搬距離や給水の方法なども重要である。

これに対し先述の神戸市等の対策の検討においては、提案した対策がどのような効果をもたらすかの

検討が行われており、地震後の住民に対する水の供給の状態が具体的に示されている。そのような立場に立つ詳しい報告書として、文献14)においては、阪神・淡路大震災における水道の被害、復旧や応急給水の過程と、住民の声を詳細に分析し、市民の視点からの地震対策と効果に関する検討が行われている¹⁴⁾。さらに住友・平山¹⁵⁾は震災後の水道被害が住民生活に及ぼす影響の検討の重要性を指摘し、阪神・淡路大震災後の神戸市の応急給水の状況に関する詳細なシミュレーションを行い、住民に対して給水がいかに行われたかを検討し、水道による給水に制約を受けた不自由な住民生活の状況を再現している。これらは、とくに住民の立場に立つことに重点を置いている点が、これまでには見られなかった特

徴である。

今後地震対策を考えるにあたっては、程度の差はあれ、このような視点が取り入れられるものと思われる。ところで先進的なこれらの例の耐震化計画の策定の中においては、当該給水区域の特性に立脚した応急給水のシミュレーションにより、住民の立場も考慮して水の運搬距離なども勘案した評価のもとに、対策が検討されているが、これを異なった事業体、あるいは検討外の対策の評価に適用するのは難しい。

本研究においては、これから地震対策を検討しようとする事業体において、ハードからソフトにわたる種々の対策の及ぼす効果を評価できるようなモデルを検討した。できるだけ一般性を持たせることに重点を置き、水道システムの特性や対策を、できるだけ単純化したパラメータで表すことができるように工夫した。

2. 水道における各種の地震対策とその特徴

これまでで提案されている水道の地震対策で、広く利用可能と考えられる対策を整理したものが表-1である。それぞれの対策を、地震被災後の応急給水と応急復旧に、どのように有効であるかという点から整理している。応急給水については、給水のための水源、住民に対する給水拠点、給水のための資材、給水活動の4つの観点から、応急復旧については、漏水発見のための調査用水、調査活動、復旧活動、復旧資材の観点から評価を行った。また定性的で厳密性は欠くが、それぞれの対策を進める上での費用、時間(年数)、効果の確実性を付記した。

水源から配水池に至る上位レベル(配水池より上流側)施設の耐震化を行い、地震後もその機能を維持できるようにすることにより、応急給水や漏水調査のための水を確保することができる。これらの対策は確実性は高いが、完成までに費用や時間がかかるのが難点である。配水池の耐震化や容量増、緊急遮断弁の設置は応急給水用の水源を確保することになる。容量増や遮断弁は、水の貯留に効果を発揮するが、漏水調査に対しては貯留水では対応できない。配水管を耐震化して、地震後の下位レベル(配水池より下流側)の機能低下を抑制することは、消火栓等を使った応急給水拠点の設置や、調査復旧活動の効率化に貢献する。

給水応援協定を結ぶことは、人員や給水資機材の補充を期待でき、さらに日頃からお互いの給水区域に関する情報交換や、緊急時の行動について検討しておくことにより、応急給水を効率的に進めることが可能になる。これは復旧応援についても同様である。これらの協定においては、道路交通事情や、そ

の他協定を実行する上での妨げとなる、不測の事態が発生する可能性があり、やや確実性は劣るが、費用や時間がかからずに行える対策である。

情報通信や広報体制の整備は、被災後の情報伝達を促進することにより、応急給水や復旧の活動を支援する。

以上のように、水そのものを確保することを主眼とし、費用や時間を要するが確実性の高いハード面の整備から、種々の活動の効率化を支援し、比較的少ない費用で早期に行えるソフト面の対策まで、種々の方策が考えられる。各事業体においては、それぞれの現状と特性に応じて、これらを適切に組み合わせ、整備順序を決定することが求められる。

以下においては、本表に示されたいくつかの対策を中心として、給水区域の特性に応じて、その効果を評価する手法を検討する。

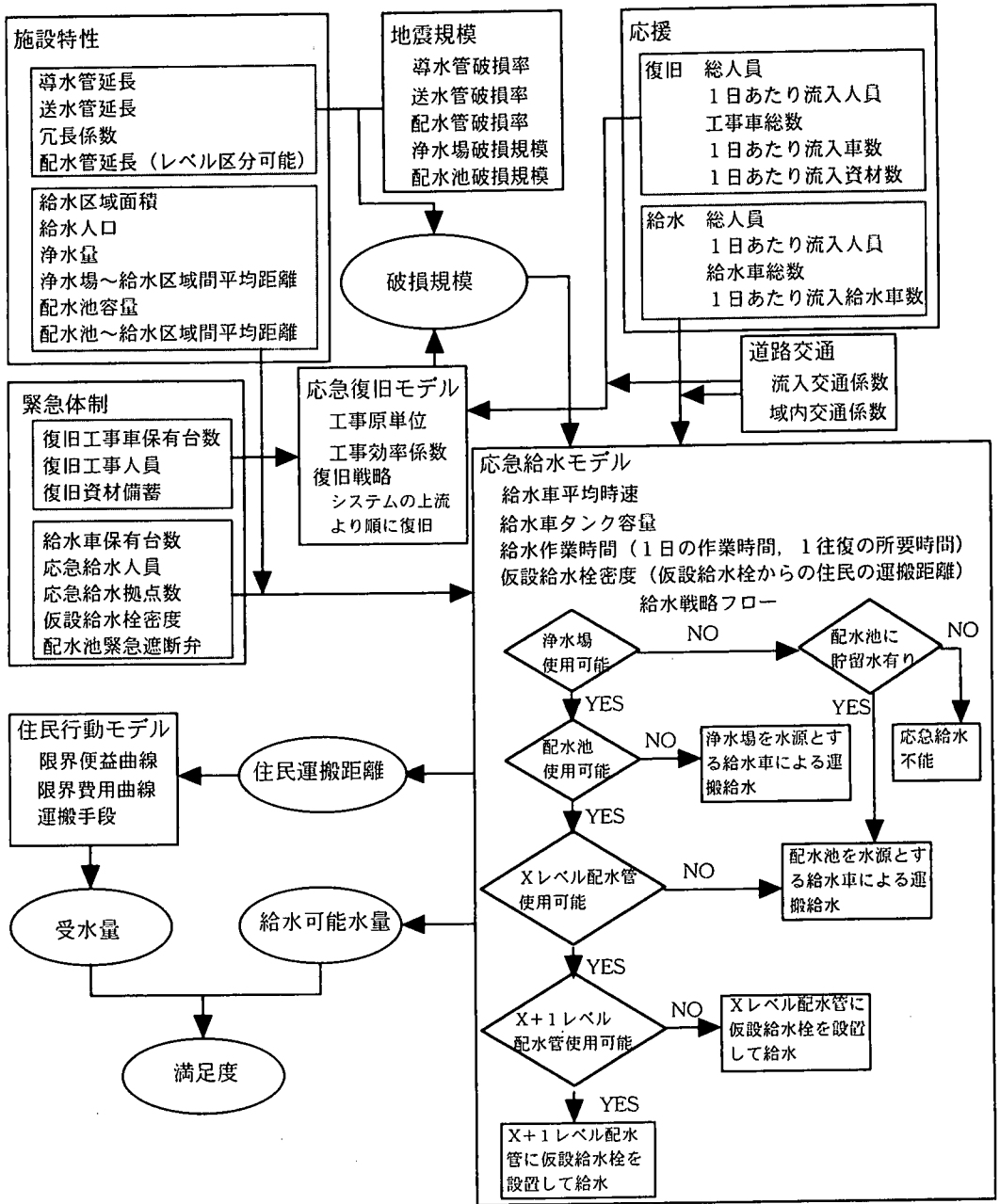
3. 給水・復旧過程を検討するシミュレーションモデルの構築

(1) 検討したモデルの特徴

ここで検討するモデルは、できるだけ一般的に適用でき、種々の対策の効果が評価できることを目標としている。したがって、各事業体ごとに固有の管網条件を入力して計算を行い、地域的な個々の給水状況を検討するようなことは行わない。水道システムの特性を、簡単なパラメータで入力し、給水区域全体の平均的な状況で評価を行う。

これまでの地震に対する水道システムの評価において、しばしば用いられてきたのは、地震後の断水率の時系列的変化である。しかしこの方法は配水管からの直接給水可能区域を示しているだけであり、それに至るまでの運搬による応急給水の状況については評価できない。より住民を中心におくならば、回復状況に対応した応急給水の環境まで考慮し、給水可能水量や、住民の水の運搬距離を評価の指標とする方が適切である。阪神・淡路大震災後に進められた耐震化の検討やいくつかの研究では、これらによる評価も加えられている。しかし最終的に水を受水し運搬するのは住民であり、供給側のこのような体制の回復が、必ずしも住民側に必要な水量の受水を可能にするとは限らない。

そこで本研究では、住民の応急給水に対する行動も考慮したモデルを考え、事業体側の給水可能水量とともに、実際に住民に受水される水量、及びそれに対する住民の満足の程度をも加えた評価を試みる。本モデルの概要を図-1に示す。以下にモデルの概要を述べる。



図一 復旧・給水モデルの概要

(2) 被害の設定

a) システムの設定

システムの特性は、施設構成と緊急時体制を、図中に示すようなパラメーターで与える。導送水路が複数になっている場合には、とりあえずの復旧のために修理が必要な被害箇所数は少なくなると考えられる。この冗長性の程度を冗長係数で表し、破損数に冗長係数をかけることとする。例えば導水路が2系統の場合には、冗長係数を0.5と与える。

配水管網については、配水幹線、配水本管、配水枝管に対応させたクラス分けが、必要に応じて可能であるようにしている。

浄水施設、配水施設では貯水容量と給水区域までの距離を与える。配水施設については緊急遮断弁の有無も考える。

b) 施設被害の設定

検討の対象とする地震の規模に対応した破損の発生率を与える。管路については、過去の地震による

破損発生時の分析結果をもとに、構成管渠の管種や管径に応じて、長さ当たりの破損発生数を与える。被害の指標は配水管の被害を基本とし、配水管の被害1箇所を被害1単位とした。復旧資材の数量もこれを単位として表現する。

浄水施設や配水池の被害は、施設の耐震化のレベルに応じて、被害単位数で与えるものとする。配水池に緊急遮断弁が取り付けられている場合は、遮断弁により貯留される割合を遮断係数として与え、これを配水池容量に掛け合わせて、配水池に被害が発生した時に貯留される水量を求める。

(3) 復旧及び給水モデル

a) 復旧体制

応急復旧の工事班は、作業人員、工事車両、復旧資材の3要素で構成される。1班を構成する工事車両、人員数をあたえる。資材は復旧工事の実施件数に対応して使用され減少していく。自前の作業人員数、工事車両数、備蓄資材数より復旧工事班の初期値が計算される。これにそれぞれの要素の応援による流入数を順次加えていき、復旧工事班数が求められる。

b) 復旧活動

川上¹⁰⁾はこれまでの地震による被害と断水の関係を整理して、配水管1kmあたり0.2箇所の被害を境に、断水率が0から1に急激に変化すると述べている。阪神・淡路大震災で被災した神戸、芦屋、西宮の各都市では、いずれの管種においてもこの被害率を大きく上回った。今後ダクタイル鋳鉄管や耐震継手の普及が図られたとしても、阪神・淡路大震災級の地震を考える際には、この被害率を下回る状況には当分至らないものと考えられる。したがってシミュレーションモデルにおいては、地震直後の、断水率が100%になる状況からスタートするものとする。

復旧の状況はその戦略によって異なってくる。通常、復旧のためには水が必要であることから、システムの上流から復旧が行われる。また配水管網の復旧についても、重要施設を優先する等の、種々の意図を持った戦略が考えられる。ここでは、システムの上流から順次復旧が行われ、配水管網については詳細な管網情報は用いず、平均的な状況をシミュレーションすることを目的としていることから、全破損数に対する修理数の割合で、通水が回復していくものと考えられる。

実際の復旧工事の効率は、工事班1班当たりの1日あたり配水管修理箇所数（すなわち先に定義した被害単位数）で与える。導送水管のような大口径管で、埋設状況等により修理の規模が大きくなり、時間がかかる場合には、修理効率係数を、修理原単位

にかけることとする。

システムの上流より、1つの要素の被害単位数がゼロになると、つぎの要素の復旧にとりかかる。

c) 給水体制

図-1の中にフローチャートで示したように、破損の状態に対応した応急給水体制をとるものとする。浄水場までの破損がゼロの場合には、浄水場を水源として、給水車による給水を行う。このとき、導水管の破損がない場合は水量に制約はないが、破損がある場合には貯留されている水を使用する。配水池までは破損がない場合は、配水池を水源として同様の扱いとする。

あらかじめ与えられている、給水車による応急給水の拠点数と給水区域の面積より、1給水拠点の受け持つ面積を求め、住民による水の平均運搬距離を求める。給水車が揃わず、給水車数と1台あたりの給水回数より求められる、1日あたりの延べ給水回数が、拠点数に満たない場合には、延べ給水回数が拠点数となり、各拠点で1回だけ給水が行われる。

d) 給水活動

給水車による給水活動については、給水車の速度と、給水用水源と給水拠点の距離より求められる移動時間、及び給水等に要する時間と、1日あたりの活動時間より給水回数を求める。

配水管が復旧すると、それに仮設給水栓を設けて給水を行うこととする。仮設給水栓を使用する場合は、給水量の制約はないものとする。配水管の埋設状況に応じて、仮設給水栓からの住民の運搬距離（仮設給水栓密度）を与える。

e) 応援

応援により流入する作業人員、工事車両、資材の総数と、1日あたりの流入数を与えておく。応援協定が結ばれている場合には、応援隊の派遣が効率的に進めることができると考え、1日あたりの流入数を増加させる。

f) 道路交通

道路交通については、被災地域までの域外交通と、地域内の域内交通を考える。それぞれに対して係数を与え、交通渋滞の程度を係数値により表示する。応援による流入に対する渋滞の影響を、e)において述べた1日あたりの流入数に、域外交通係数をかけることにより表す。また地域内の移動時間に域内交通係数をかけることにより、地域内の渋滞の影響を表す。

(4) 住民の水獲得行動

水道事業者側が、住民に必要と考える水量を給水できるようにしても、応急給水の方法が住民の状態を考慮していないものであったならば、意図した水量が住民に受水されない場合も起こりうる。ここでは住民の受水行動を組み込むモデルを検討する。

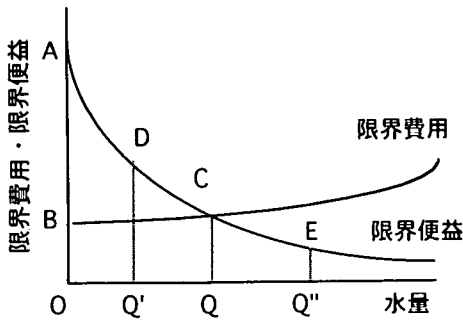


図-2 住民の給水利用と効用

表-2 検討したモデル事業体

給水人口	500000人
給水面積	50km ²
導水管延長	10km
送水管延長	2km
配水管延長	1000km
浄水場～給水区域	7km
配水池～給水区域	5km
配水池容量	30000m ³
配水管復旧時の運搬距離	10m

図-2は受水量による利用者の限界便益と限界費用を示したものである。飲料水やトイレ用水など必要性の高いものから、洗濯、入浴水のような比較的優先度の低いものなど、水の利用目的は多岐にわたっており、水量の増加にともなって限界便益は減滅する。限界費用は水を獲得するための労力や時間などに起因するものである。

利用者は限界便益と限界費用が等しくなる交点Cに対応する水量Qを受水する。このとき、受水した水による利用者の効用は、QCAOで表されると考えられる。

このときに給水可能量がQ'しかないならば、効用はQ'DAOとなる。利用者は現在の自分のおかれている状況から、水の獲得のためにQCBOの努力（費用）を払い、Qの水量で得られる効用QCAOを得たいと思っているにも関わらず、QCDQ'が不足しており、不満を感じるようになる。

ところで入浴や洗濯などは毎日行うことは我慢ができて、数日単位で見た場合には必要性が高くなっていく。すなわち限界便益曲線（需要曲線）は日を経つにつれて変化することが考えられる。ここでは、限界便益曲線は経日的には変化しないものと考え、そのかわり1週間単位で見た場合に、住民が不満を感じない程度の水量を考え、その1日あたりの水量をQ"とする。すなわちQ"の水量による効用Q"EAOは、飲料水、トイレの使用などととも、数日に1回の洗濯や入浴が可能となり、平常時とまではいかなくとも、受忍限度内の水使用行動が行えることにより得られる。住民はQ"の水量を得たいと感じながらも、応急給水方法の制約のために、Qの水量に甘んじようとしている。その結果Q"ECQだけ効用が不足している。

住民の応急給水に対する不満は、2つの要因から成り立つと考えられる。図のQCDQ'に対応する、現実の応急給水環境下で払おうとする努力に対して、満たされない水量に対する不満と、Q"ECQに対応する、応急給水の環境が不十分であるために、必要な水量が得られないことに対する不満である。以上

より、満足の程度を示す指標として、 $Q'DAO/QCAO$ と $QCAO/Q"EAO$ を考え、それぞれ給水量満足度、給水環境満足度と定義する。さらに両者の積は、震災後の生活に必要な水量に対する実際に使用している水量による満足度を与え、これを応急給水満足度と定める。

4. 事例による検討

(1) モデル事業体を対象としたシミュレーション

モデル事業体を対象にして具体的な検討を行う。表-2で示されるような諸元を持つ中規模の事業体を考える。配水管の修理が終了した時点で、各戸に1栓ずつの給水栓が仮設されるとして、住民の水の運搬距離は10mになるとする。

被災後の状況に関するパラメーターは表-3のようにした。導送水管の破損率は、大口径のCIP(鋳鉄管)を念頭におき、阪神・淡路大震災時の被害分析結果¹⁷⁾を参考に、500mm以上のCIPの被害発生率である0.3件/kmと設定した。配水管網はブロック化は行われておらず、またCIPとそれよりも破損しやすい石綿セメント管も残存しているとして、ひとまず阪神・淡路大震災における75mm以下のCIPの破損発生率である2.6を与えた。導送水管の破損1ヶ所の、配水管の破損に対する修理効率係数は0.2と仮定した。浄水場は破損しないとした。

ここでは資材が復旧の制約になることはないように、必要に応じて供給があるものとした。また給水及び復旧活動において、作業車と人員はつねにバランスがとれており、一方が制約になることはないようにした。給水車の平均時速は30kmとした。これは平常時の給水区域内の平均的な時速で、対象とする都市の交通事情により決定する。

阪神・淡路大震災では、給水車の応援は神戸市で1週間後に、芦屋市で10日後に最大となっていた。また復旧の応援は、神戸市では5日後より本格化して約1カ月後に、芦屋市では1週間後くらいから本格化し、3週間後に最大となっていた。そこで応援給水の車と人員、復旧の工事車と人員の流入割合

表-3 モデル分析におけるパラメータ設定値

パラメータ	設定値
破損	
導送水管の破損発生率	0.3件/km
配水管の破損発生率	2.6件/km
配水池の破損発生数	50ユニット
給水関係のパラメータ	
保有タンク車	15台
応急給水従事職員	30人
応急給水班構成	給水車1台, 人員2人
設定給水拠点	80箇所
給水車平均時速	30km
移動以外の時間	2時間/回
1日あたり給水作業時間	最初の6日は15時間, 7日目から12時間
地元の給水応援	タンク車35台, 人員70人 (翌日より活動可能とする)
応援給水車	2日後より50台/日到着, 計250台
応援人員	2日後より100人/日到着, 計500人
復旧関係のパラメータ	
保有工事車	10台
復旧工事従事職員	50人
備蓄材料	30ユニット
工事班構成	工事車1台, 人員5人
工事効率	3箇所/班日 (導・送水管の工事効率係数0.2)
応援工事車	5日後より5台/日で到着, 計50台
応援人員	5日後より25人/日で到着, 計250人
工事材料	工事に支障がないように供給
その他のパラメータ	
域内交通係数	初日0.1に低下一様に上昇して30日後に0.8まで回復
流入交通係数	初日0.5に低下一様に上昇して30日後に1に回復
冗長係数	全て1

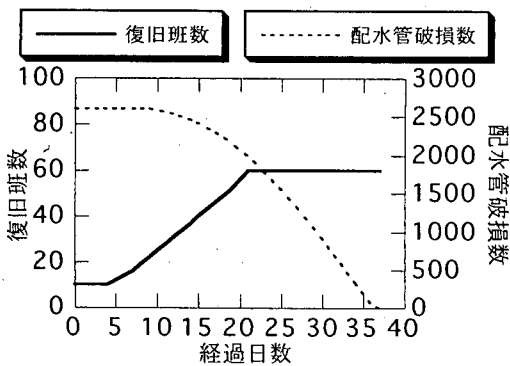


図-3 復旧班数と配水管の修理状況

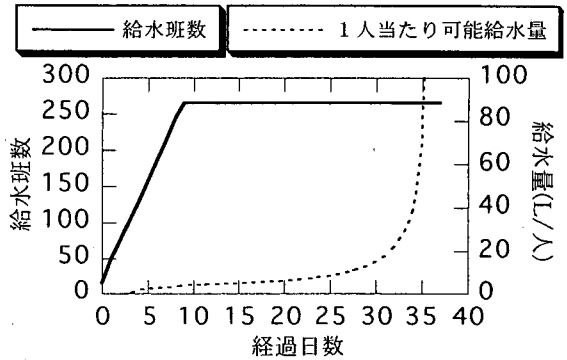


図-4 給水班数と可能給水量

を, 交通事情で削減されることを考慮して, 平常時ベースで表-3中のようにした. 阪神・淡路大震災直後の救援車の時速が, 1~5kmになったという報告もあることから¹⁸⁾, 域内交通係数は, 当初0.1まで

下がることとした. 他地域からの流入交通係数は0.5まで下がることとした. 給水車のタンクの容量は2tとした.

以上の条件のもとでシミュレーションを行った結

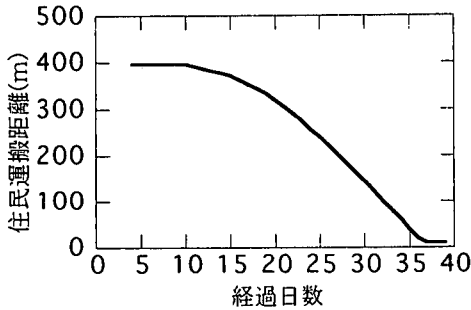


図-5 住民の平均水運搬距離

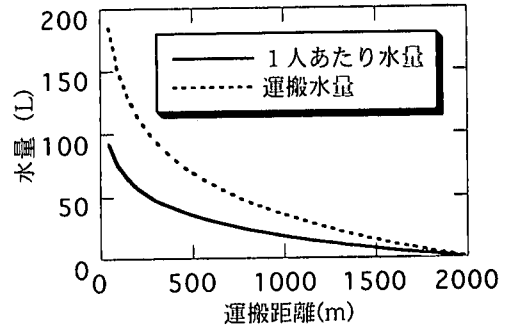


図-6 設定した徒歩運搬距離と水量の関係
($h=0.000333$)

果を図-3,4,5に示す。復旧工事班の予定数がそろうのは交通事情のため21日後になる。導水管や配水池の修理に9日目までを要し、配水管の破損が減少が始めるのは10日目からである。

図-4の1人あたり可能給水量は、給水車による給水拠点における水量を対象としている。仮設給水栓の場合は、先述のように水量には制限はない。給水車がそろうのは9日目である。3日目までは導水管も破損しており、応急給水の水源が得られない。4日目より導水管が復旧して、浄水場を水源として応急給水が始まるが、1人あたりの給水可能水量は20Lに満たない。11日目より一部で配水管の復旧による仮設給水栓からの給水が始まる。それともない、給水車による拠点1箇所あたりに展開できる給水車の数が増加を始めるので、1人あたり給水可能水量も徐々に増加する。

図-5は住民の平均水運搬距離を示している。配水管の修理が進み仮設給水栓の設置が進むにつれ、平均運搬距離は減少する。

(2) 住民側からの検討

a) 限界費用に関する検討

水を獲得するための労力、時間を費用として表すためにつぎのように考える。

体重を B 、運搬する水量を Q とすると、距離 x を運搬するときの仕事は $(B+hQ)x$ となる。ここで h は運搬手段による水の重量の軽減を表す係数である。 hQ で重量の次元になっているものとする。利用者の仕事率を r_w とすると、運搬に要する時間 T はつぎのようになる。

$$T=(2B+hQ)x/r_w \quad (1)$$

さらに給水車による給水の場合、給水車の待ち時間や、給水に並ぶ時間を見込む必要があるため、これを係数 a をかけることで表すと次式のようなになる。

$$T=a(2B+hQ)x/r_w \quad (2)$$

現実には複数回運搬することもあり、獲得水量と時間とは連続的な比例関係にあるとはいいがたいが、ここでは式(2)のように表されるものと仮定する。時間と費用は比例関係にあり w で変換できるも

のとすると、限界費用 MC はつぎのようになる。

$$MC=wahx/r_w \quad (3)$$

当初の r_w を r_{w0} とし、疲労が蓄積するにつれこれが低下するので、 $r_w=rr_{w0}$ とあらわすと、式(3)はつぎのようになる。

$$MC=wahx/rr_{w0}$$

wh/r_{w0} をあらためて h とおくと式(3)は次式のよう書き直される。

$$MC=ahx/r \quad (4)$$

ここで r は、疲れがなく通常通り動ける場合に1で、疲労するにつれ減少する、体力の状況を表す係数である。

なおここでは人力で運搬する場合を考えているが、バイクや車等を使用する場合にも、時間は距離に比例するものと考えられ、水量も1回あたりに運ぶことができる量は限られており、水量が増加すると運搬回数が増加する。これを水量と連続的な比例関係と仮定すれば、式(4)を用いることができる。

式(4)により運搬距離やその手段、給水方法、疲労状況等、住民側の事情をも考慮に入れた検討が可能になる。

b) パラメーター値の設定

具体的な便益や費用の値を求めることは困難なので、種々の調査等を参考に徒歩で給水車より水を獲得する場合についてつぎのように仮定した。

$$MB=\exp(-0.04Q)$$

$$a=1.5$$

$$h=0.000333$$

給水車による給水時間の不確実性等のために、実際に運搬に要する時間の1.5倍の時間を見込むものとした。神戸市においては阪神・淡路大震災以前より、応急給水拠点として半径2kmの範囲を考えていたこと、また阪神・淡路大震災1週間の行動調査より、水調達のためのトリップの所要時間は30分までが最も多く、1時間までが大部分を占めていた¹⁹⁾ことから、上式群の設定では移動距離の最大が2000

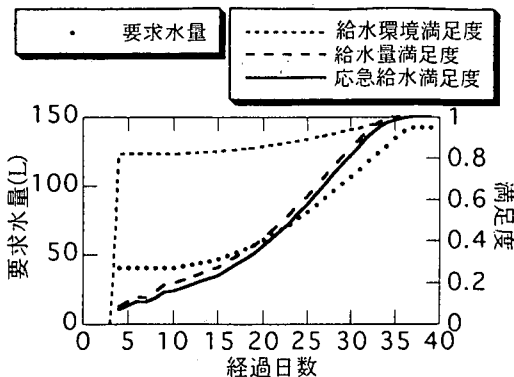


図-7 住民側から見た応急給水の評価

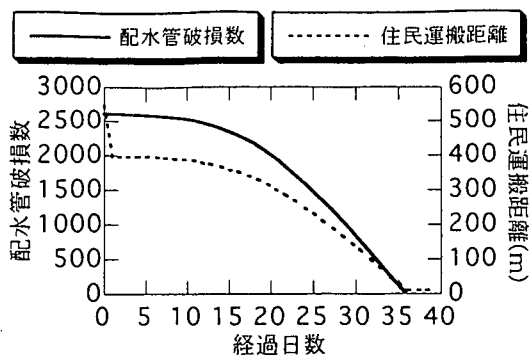


図-9 配水池までを耐震化した場合の効果

表-4 配水管網の階層化の例

管	延長(km)	破損発生率 (件/km)	平均運搬距離 (m)
Aクラス配水管	200	0.9	250
Bクラス配水管	300	1.8	100
Cクラス配水管	500	2.6	10

に対し、給水者側が十分な水量を供給することができず、給水量満足度は低い。

(3) 地震対策の効果

作成したモデルを用いて、(2)において検討した事業体に対する、種々の対策の効果を調べる。

a) 配水池より上流側の耐震化

配水池に緊急遮断弁を設置し、貯水容量の半分の水を確保した場合と、配水池を耐震化して、破損をゼロとした場合の、初期の1人当たり可能給水量を図-8に示す。

緊急遮断弁を設置した場合、それにより配水池に確保された水を利用して、初日より応急給水が行われる。その水量は給水車の増加ともなって増加する。対策を行わなかった場合は、3日目まで給水が不可能であったが、その状況が改善されている。

配水池の耐震化を行った場合も3日目までの傾向は同じであるが、4日目以降の可能給水量が他の場合より多くなる。4日目から8日目の間は、導水管が復旧して、他の2ケースでは浄水場を水源として給水車が応急給水を行うのに対し、配水池を水源として利用できるために、給水車の移動距離が短くなることによる。さらに9日目以降も若干多くなっているのは、配水池の修理をする必要がないために配水管の復旧が早まり、一部仮設給水栓による給水が開始される結果、給水車の融通がよくなることによる。なお7日目に水量が若干低下するのは、7日目から1日あたりの応急給水の作業時間を15時間から

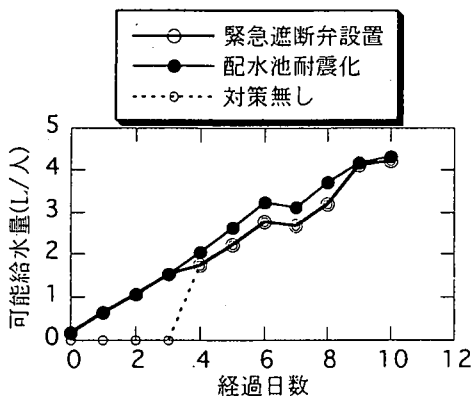


図-8 配水池に対する対策と可能給水量

mになるようにしている。また世帯構成を考慮して2人分の水を運ぶものと仮定した。

このときの運搬距離に対する需要曲線は図-6のようになる。

さらにQ²として、数日周期で必要になる水量を考慮して1人1日100Lを仮定した¹⁾。rはひとまず1のみで、経日的な変化はないものとしておく。

c) 住民側から見た給水の評価

住民の水の運搬距離より、住民が必要とする要求水量を求めた。さらに給水量満足度、給水環境満足度を求め図-7に示す。満足度の計算にあたっては、給水車から給水を受けている区域と、仮設給水栓から給水を受けている区域は別々に計算して、区域数による加重平均を取った。仮設給水栓から給水を受けている場合には、水量に制約はなく、給水量満足度は1であるとした。

導水管の破損により全く給水が行われない場合には、給水環境満足度は0となるが、給水が始まると上昇する。ここでは給水が始まった途端に0.8程度まで上昇している。これは住民の運搬距離が395mであり、住民は1人当たり40Lの運搬受水が可能となるためである。しかし給水開始当初は、この需要

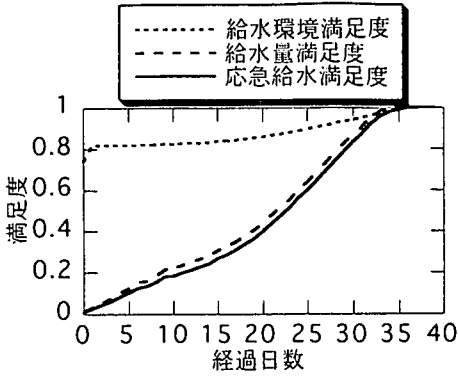


図-10 配水池までを耐震化した場合の満足度

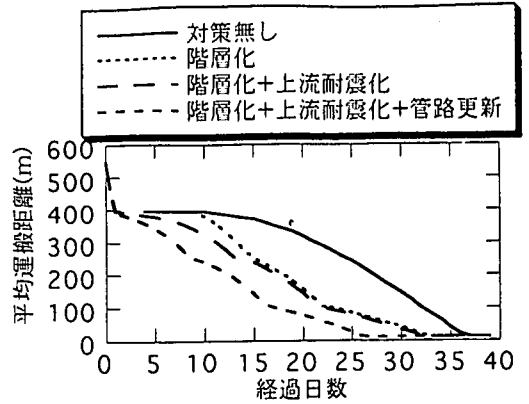


図-12 配水管に対する対策と平均運搬距離

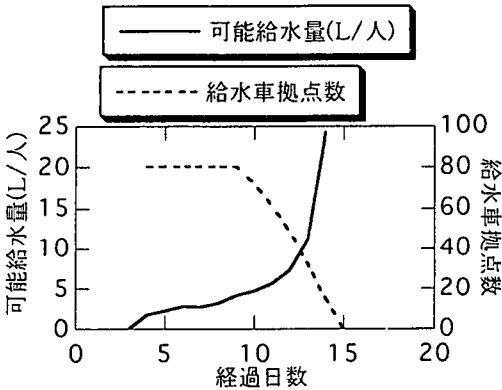


図-11 配水管を階層化した場合の給水車による
応急給水の変化

12時間になっているためである。

配水池までの全ての施設、すなわち導、送水管、浄水施設、配水池を耐震化し、破損が発生しないようにした場合の結果を図-9,10に示す。この場合、初日から配水池を水源とする応急給水が可能であり、翌日から全ての設定給水拠点に、給水車が配備されるので、住民の平均運搬距離は395mとなる。そのため初期の給水環境満足度は、図-7と比べるとわかるように、対策を行わない場合に比較して、大幅に大きくなる。しかし4日目以降の満足度は、対策を行わない場合に対して、顕著に改善されているとはいいがたい。すなわち上流側の耐震化は、地震後数日間の給水に効果的であるが、その後の状況にはあまり貢献し得ない。したがって耐震化を行うに至っていない場合にも、上流の早期の復旧、あるいは応急給水対策を考えておくことで対応ができる。

b) 配水管網の階層化及び管更新

配水管網を階層化し、幹線から復旧を始め、随時仮設給水栓を設置していくこととする。その内容を表-4に示す。1000kmの配水管網をA,B,Cの3段

階に階層化する。上位層のものほど大きな管であり、破損発生率は小さいとした。表-4に示したA,B,Cクラスの破損発生率は、阪神・淡路大震災におけるCIPのφ300~450, φ100~150, φ75以下の破損発生率をそれぞれ引用した。それぞれの管網が復旧した場合には、仮設給水栓を設置して応急給水を行う。各クラスの配水管は、給水区域内にメッシュ状に整備されているものとして、それぞれの仮設給水栓からの、住民の水の平均運搬距離を、表-4中のように設定した。

以上に加えて、配水池までを耐震化した場合と、さらに管路の更新を行い、破損発生率をA,B,Cクラスそれぞれ1ランク向上させて、0.3,0.9,1.8とした場合について検討した。

図-11は配水管を階層化した場合の、給水車による給水拠点の数と、そこにおいて1人当たりに給水可能な水量を求めている。階層化することにより、仮設給水栓からの給水を、早くから開始することができるようになり、給水車拠点当りに出動できる車の数が増え、無対策の場合を示す図-4に比べ、1人当たりの給水可能水量が、10日後より顕著に増加している。

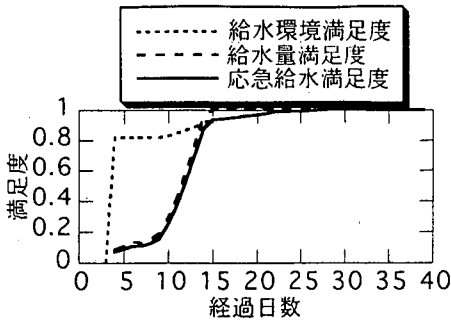
図-12はそれぞれの場合の、住民の平均水運搬距離の変化を示す。階層化により、配水管の仮設給水栓の使用が早くなり、平均運搬距離は短縮される。さらに管路の更新を行うことで、運搬距離は短くなる。上流側の耐震化は、初期以外にはあまり効果は発揮しない。

図-13は満足度の変化を示す。対策を行わない場合及び配水池より上流側のみを耐震化した場合に比べて、給水量の満足度の増加が顕著である。

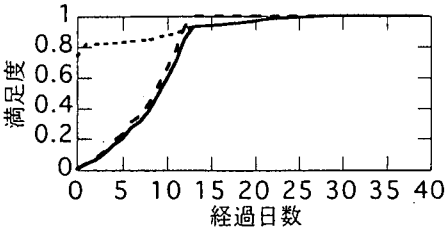
c) 応援体制の整備及び交通対策

応援給水協定を結び、事前に被災時の応援の体制を整えておくことを考える。

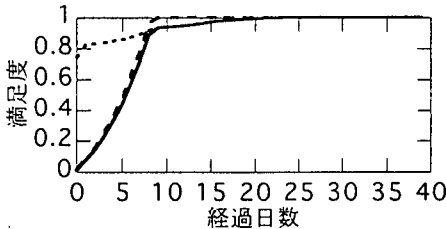
給水応援が2日後より50隊ずつ流入するとしていたのを、協定により1日後より100隊ずつ流入する



a) 配水管を階層化



b) 配水管階層化と配水池及び上流を耐震化と



c) 配水管階層化、配水池及び上流の耐震化と管更新

図-13 配水管に対する対策と満足度

体制をつくっているとする。図-14にはこのような協定を結んだ場合と、さらに緊急車を優先的に通す交通対策も行って、流入交通係数が、初日に0.8でその後一様に上昇し、30日後に1になるとした場合について、給水班の変化を示した。無対策の場合は給水班が揃うのが9日後であったのが、上記の対策により、それぞれ5日後と3日後となっている。

復旧応援についても、5日後より5隊ずつ流入するとしていたのを、協定により3日後より20隊ずつ流入する体制にあるとした。さらに上と同様に流入交通対策も考えた。その結果を図-15に示す。この場合にも復旧工事班の増加が大幅に改善されている。

図-16はそれらの結果としての住民の満足度の変化を示している。

このように、応援協定による効果を、事前の情報交換や詳細事項の取り決めの結果として、応援部隊の流入速度の増加として定量的に表示することで、シミュレーションにより協定の評価が可能になる。

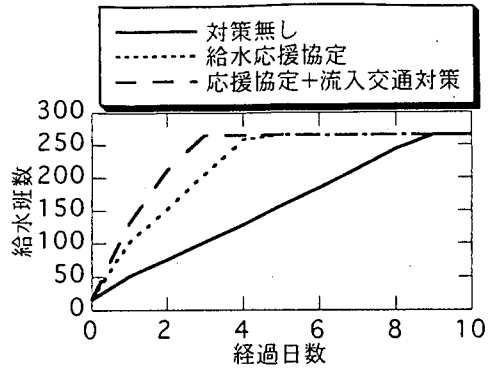


図-14 給水応援協定及び交通対策の効果

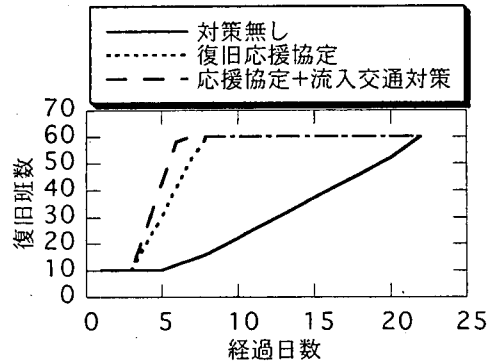


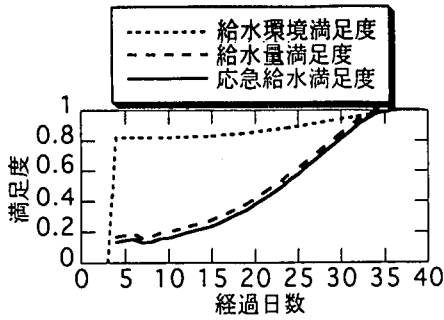
図-15 復旧応援協定及び交通対策の効果

d) 応急給水方法の改善

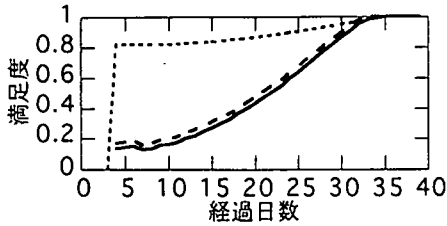
給水車による応急給水では、車の移動のための時間と、給水拠点における給水活動のための時間、水源における給水車への供給のための時間が必要となる。ここではそれらに要する時間を2時間と仮定している。この時間を短縮することにより、給水車の稼働効率を上げることができることから、給水車から各個人に給水するのではなく、給水拠点に仮設の水槽を設け、いったん仮設水槽に給水する方法が考えられている。このような手段を講じることの効果を見るため、車の移動以外に要する時間を、2時間から30分に短縮した場合を考える。

一方住民側の運搬手段の改善も考えてみる。ここでは改善された運搬手段として、手押しの台車を利用する場合を考えることにする。20Lの水を入れたポリタンクを台車に乗せて、種々のコンクリート舗装上をバネばかりで引っ張って移動させたところ、1~2kgの値を示した。そこで台車を利用した場合には式(4)のhは1/10になるものとした。

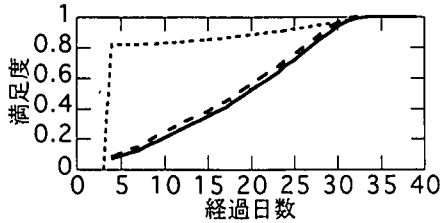
シミュレーションの結果を図-17に示す。a)は仮設水槽を設置した場合の、給水車による給水拠点における1人当たりの可能給水量を、仮設水槽がない場合と比較して示している。可能給水量は10日後に



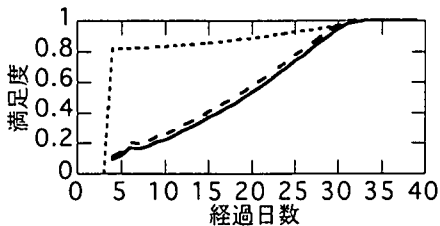
a) 給水応援協定



b) 給水応援協定と流入交通対策



c) 復旧応援協定

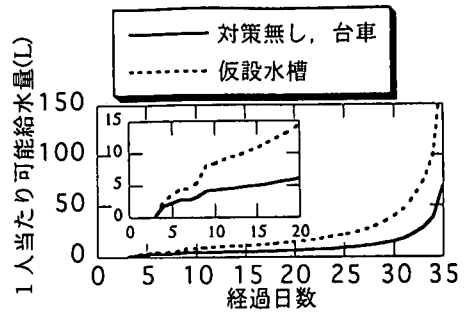


d) 復旧応援協定と流入交通対策

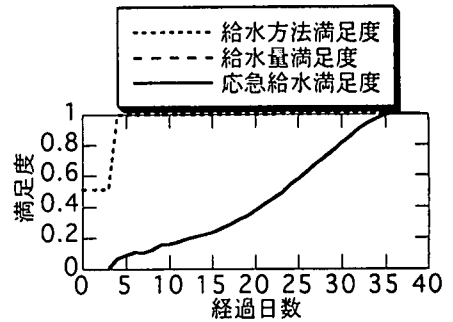
図-16 応援協定の効果

約2倍、20日後は約2.4倍になっている。その結果、c)に見られるように、給水量満足度が大きくなっている。

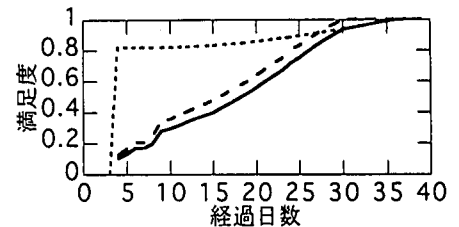
住民が運搬用の台車を整えた場合には4日後、すなわち給水車による応急給水体制が整ったときに、給水環境満足度はほぼ1になっている。しかし給水側の体制が整わないために、水量的に住民の需要を満たすことができず、給水量満足度は徐々にしか上昇しない。(図-17b)では、給水環境満足度が1であるため、応急給水満足度と給水量満足度が等しく



a) 可能給水量



b) 台車



c) 仮設水槽

図-17 応急給水方法の影響

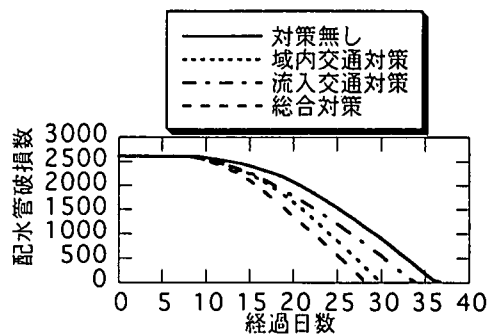


図-18 交通対策と修復復旧の関係

なって重なっている。)すなわちこの場合には、これからの対策として、給水方法よりも給水量の改善が求められる。

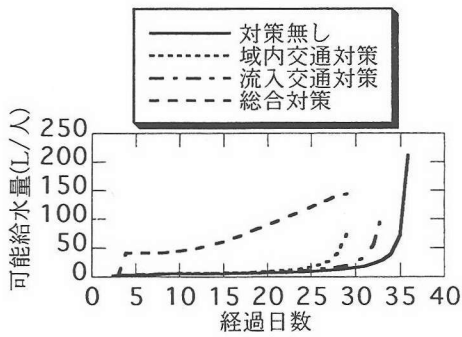


図-19 交通対策と給水可能水量の関係

e) 交通対策の効果

災害時を考えた道路の整備等により、域内交通係数が初日に0.1に低下後、一様に上昇して15日後に0.8まで回復し、30日後に1まで回復する場合、交通規制手段等により、流入交通係数が初日に0.8でその後一様に回復し、30日後に1になる場合、及びその両方を行う総合対策を考える。図-18,19はそれぞれ配水管の破損数の変化と、給水車による給水拠点における1人当たり可能給水量の変化を示している。効果的な交通対策を行えば、復旧や給水の環境がかなり改善されることを示している。

(4) 都市形態の違いによる影響

異なったタイプの給水区域について、地震対策の効果がどのように変化するかを検討してみる。1つは送水管延長が20km、浄水場から給水区域までの平均距離が25kmの都市を、いま1つは給水人口が10万人、すなわち人口密度が先の事例に比べて1/5の都市を考える。両方の都市に対して基本的な設定は先述のものと同じであるとする。これらに対し、これまでに述べてきた、「導水施設から配水池までの耐震化」(a)の対策、「配水管の階層化」(b)で述べた3クラスへの階層化、「住民の運搬用の台車の整備」(d)で述べた対策、「給水車の作業時間を短縮」(d)で述べた作業時間を30分にする対策、「給水応援協定を締結」(c)、「復旧応援協定を締結」(c)、「交通対策」(e)述べた域内交通、流入交通双方の対策)の7つの対策がいかなる効果をもたらすかについて検討した。

図-20は7,14,28日後のそれぞれの満足度を示す。給水環境満足度については3つの都市において大きな差はなく、「台車の整備」によって住民の水運搬環境を整えることで、被災後の早い時期から高くすることができる。つづいて「配水管の階層化」が14日後には他の対策よりも効果を上げており、28日後には「交通対策」も効果が大きい。

給水量満足度は、全般的に低人口密度都市で高く、長距離送水都市で低くなっている。「配水管の

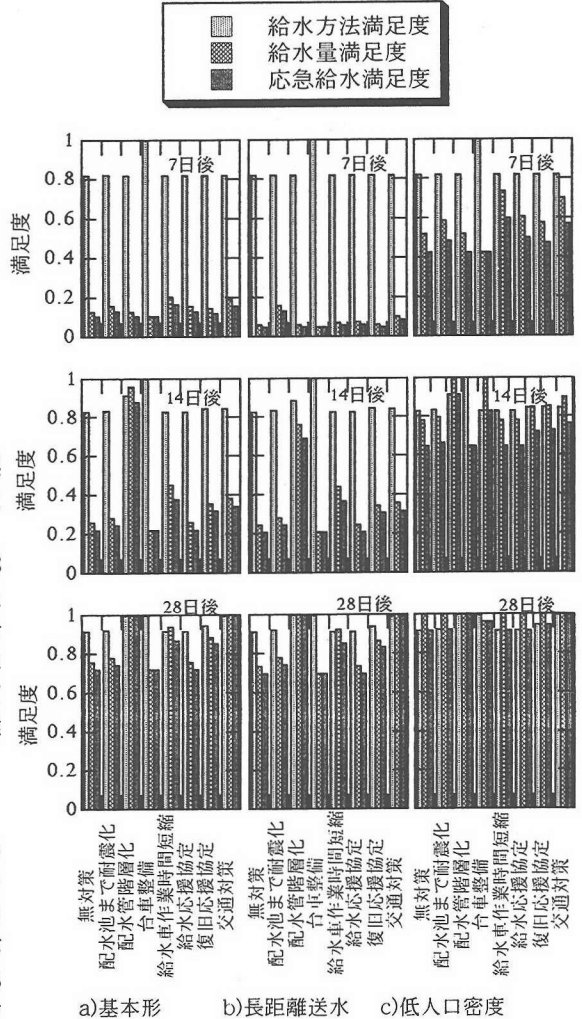


図-20 各対策と満足度

階層化」を行った場合に、7日後から14日後までの間の改善が著しい。

図-21は地震後のそれぞれのステージで、各都市において、それぞれの対策を行った場合の給水量満足度の、無対策の場合に対する比を、対策による改善度として示している。長距離送水都市の場合には、「配水池までの耐震化」がとくに初期において効果的である。人口密度が高い都市においては、「配水管の階層化」が中期から後期において効果を発揮する。「給水車の作業時間の短縮」はいずれの都市においてもとくに初期から中期に効果的である。また「交通対策」も、とくに人口密度が高い場合に有効である。

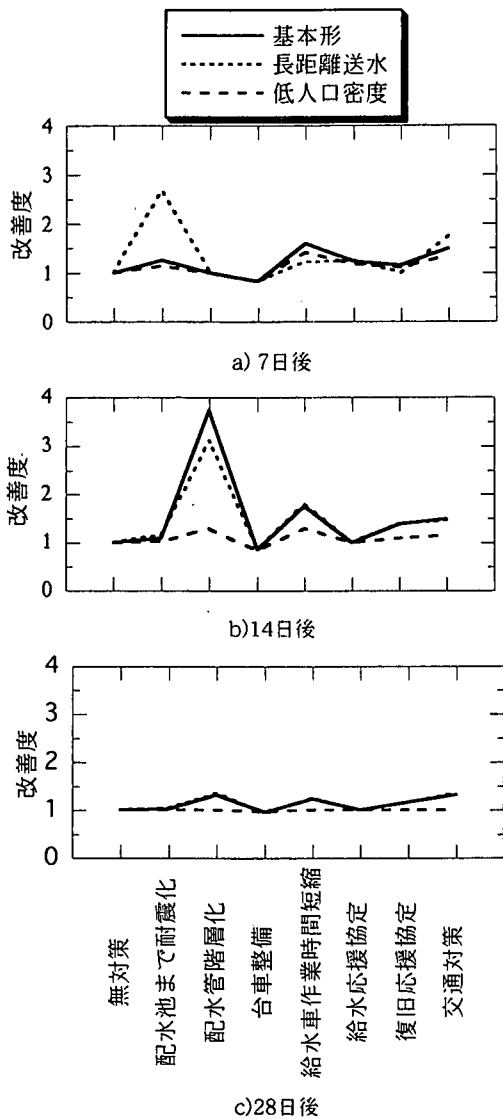


図-21 各対策による給水量満足度の変化

5. 結言

本論文では、給水と復旧に関するシミュレーションモデルを作成して、水道の種々の地震対策の効果を検討した。とくに各事業体の施設配置や給水区域の特徴を、できるだけ一般的に入力できること、施設の耐震化等のハード面から、応援協定のようなソフト面まで、幅広い地震対策を検討できること、事業体側だけでなく、給水を受ける住民側の事情を勘案できることを目指した。

作成されたシミュレーションモデルを用いて、事例事業体についての各種の地震対策の評価を行った。とくに住民側から見て、各復旧ステージにおいて、応急給水環境と給水量のいずれの改善が求めら

れているかをも判断することを可能にした。事例研究においては、設定した全てのパラメータについて考慮を行ったわけではなく、また各パラメータの設定値については、さらに検討の余地も残されている。とくに住民の側の視点にも配慮していることから、被災後の住民生活をより具体的にモデルに取り込んでいくことも重要であると考えられる^{20),21)}。このようなモデルは、これから地震対策を考える事業体において、その効果を簡略に把握するために有効であると考えられる。

謝辞：本研究を進める上で、有益なヒントやコメント、情報提供を賜った、住友恒京都大学教授、百々順一兵庫県企業庁水道課副課長、佐々木隆阪神水道企業団建設課長、松下貞神戸市水道局計画係長に謝意を表する。

参考文献

- 1) 神戸市水道局：神戸市水道耐震化基本計画，1995。
- 2) 西宮市水道局：西宮市水道耐震化指針，1995。
- 3) 阪神水道企業団水道施設耐震化計画検討委員会：阪神水道企業団施設耐震化計画報告書，1995。
- 4) 磯山龍二，片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法，土木学会論文集，第321号，pp.37-48，1982。
- 5) 星谷勝，小池精一，宮崎正敏：上水道システムの震災復旧過程の予測，土木学会論文集，第322号，pp.25-35，1982。
- 6) 星谷勝，宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文集，第331号，pp.45-54，1983。
- 7) 川上英二：小数種類の構造物からなるライフラインシステムの耐震性の評価，土木学会論文集，第312号，pp.1-13，1981。
- 8) 川上英二：単純なライフラインネットワークの被害率と供給率との関係について，土木学会論文集，第344号/I-1，pp.341-349，1984。
- 9) 川上英二：単純な形状をしたライフラインの需給点ペア間の連結確率，土木学会第47回年次学術講演会概要集I，pp.1480-1481，1992。
- 10) 能島暢呂，亀田弘行：ライフライン・ネットワークの震後復旧における最適戦略に関する基礎的研究，京都大学防災研究年報，第34号B-2，pp.27-44，1991。
- 11) 能島暢呂，亀田弘行：幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム，土木学会論文集，第450号/I-20，pp.171-180，1992。
- 12) 星谷勝，大野春雄：震災時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法，土木学会論文集，第386号/I-8，pp.387-396，1987。
- 13) 大野春雄，星谷勝：実務者の経験法則を用いた震災時上水道機能の復旧予測システム，土木学会論文集，第422号/I-14，pp.353-360，1990。
- 14) 関西水道事業研究会：市民の視点に立った水道地震被害予測及び震災時用連絡管整備に関する一考察，1996。

- 15) 住友恒, 平山修久: 震災時における応急給水のシミュレーション, 第48回全国水道研究発表会講演集, pp.614-615, 1997.
- 16) 川上英二: 埋設ライフラインの震害例と耐震設計, 配管技術, 1996年5月号, pp.65-71, 1996.
- 17) 日本水道協会工務部: 阪神・淡路大震災における水道管路の被害と分析, 水道協会雑誌, 第65巻, 第2号, pp.39-51, 1996.
- 18) 土木学会: 阪神・淡路大震災調査報告書, 社会基盤施設の被害と復旧 (ライフライン施設の被害・機能障害と復旧対策), pp.499-504, 1997.
- 19) 加藤浩徳, 味沢慎吾, 家田仁: 阪神・淡路大震災における地震発生後1週間の被災者・支援者の交通行動に関する調査分析, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.499-504, 1997.
- 20) 奥村誠・吉田秀雅: 震災時の水運搬能力と水利用, 土木学会土木計画学研究委員会, 阪神・淡路大震災調査研究論文集, pp.137-142, 1997.
- 21) 細井由彦・城戸由能・重富洋一: 労力から見た応急給水の運搬距離に関する考察, 第49回全国水道研究発表会講演集, pp.608-609, 1998.

(1998. 9. 28 受付)

ESTIMATION OF EARTHQUAKE RESISTANT MEASURES OF WATER SUPPLY SYSTEM IN EMERGENCY SUPPLY AND RESTORATION PROCESS

Yoshihiko HOSOI and Yoshinobu KIDO

A model which simulates emergency water supply and restoration of damaged facilities after the occurrence of an earthquake was developed. The presented simulation model can generally consider the characteristics of the water supply system structure and various earthquake resistant measures. The way in which water was supplied in the emergency was also taken into consideration, be it through taps, fire hydrants or human distribution. The satisfaction indexes for water supply were defined. Using the simulation model, the effects of earthquake resistant measures for water supply systems whose bases are widely spread on many levels, including structural strength and support agreements, were evaluated.