



## 消防専用水道システムの導入効果算定法

高田至郎<sup>1)</sup>、楢田泰子<sup>2)</sup>、勤息義弘<sup>3)</sup>

- 1) 正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、教授 工博  
e-mail : takada@kobe-u.ac.jp
- 2) 正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、准教授 博士 (工学)  
e-mail : kuwata@kobe-u.ac.jp
- 3) 非会員 神戸大学大学院自然科学研究科、大学院生 修士 (工学)

### 要約

本論文は、消防専用水道システムの導入効果算定手法を提案するものである。想定地震時における延焼程度から算出される必要消火水量と消防専用水道システムによる消火水量、または既存水道管路・施設の被害を考慮した消火水量とを比較することにより、システム導入前後による火災被害を算定し、システム導入に関わる費用対効果算定方法を提案した。さらに、具体的な事例として神戸市に適用した事例を示した。大火災を引き起こす地震の発生確率にもよるが、兵庫県南部地震のような地震火災が発生すれば、本システムの導入効果は十分あるといえる。

キーワード： 地震、火災、消防専用水道、費用対効果

### 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、甚大な火災被害が発生した。火災の原因の一つに、断水による水道消火栓の機能損失が挙げられる。これは、配水管・給水管の地震被害によって漏水し、市水の断水とともに消火栓も機能を喪失してしまうためである。著者らは兵庫県南部地震における水道管の被害による消火栓の稼働不能と火災による人的被害との関係について分析を行い、消火栓の水が使用できていた場合、火災による死者529名のうち32~45名(6~9%)の人命が助かった可能性があることを指摘している<sup>1)</sup>。このように、一般消防水利の整備とともに水道消火用水を確保することによって財産を守るだけでなく人命を助けることが重要である。

これまでに自然水利や既往の人工水利を地震防災に活用させるための研究が行われてきた<sup>2)</sup>。一方、海外では1906年のサンフランシスコ地震火災以降、消防専用水道システムとしてサンフランシスコのAWSS (Auxiliary Water Supply System)<sup>3)</sup>やバンクーバーのDFPS (Dedicated Fire Protection System)<sup>4)</sup>などが導入されている。現在、日本に消防専用水道システムはないが、他国と比較して地震の発生頻度が高く、木造密集地域も多いことを考慮すれば、本システムの導入は十分効果があると期待できる。消防専用水道システムは、地震時の消防水利確保が安定しており、システムの利用に関しては不都合な点は少ないが、新規導入ということからその事業費と導入効果が大きな課題となる。そこで、本研究では新システム導入による費用対効果算定法について提案し、具体的な適用事例を示した。

費用対効果分析は、公共事業の中でも建設事業、維持管理、需要者サービス業務などの事業実施に際し、投資に対する効果を客観的に判断するための手法として利用される<sup>5)</sup>。水道事業の耐震化に関わる効果について、前田ら<sup>6)</sup>は管路の修繕費と断水による企業損失額を考慮している。また、費用対効果分析は、複数ある施設の中から耐震補強すべき機器や路線に優先順位を持たせることでより効率的な方法を意思決定する指標としても広く用いられている<sup>7), 8)</sup>。本論文では、代替費用法を用いて消防専用水道システムの導入の他、同等の消火用水を確保できる方策として、既存水道管路の耐震化や耐震性防火水槽設置などの代替策の費用を比較して施設導入の優位性を示している。また、システム導入に関わる費用対効果も量-反応法を用いて示した。火災被害の軽減効果には、建物被害だけでなく人命損失も評価することが重要である。一般的には、地震防災研究では人的被害の軽減効果に便益算入は行われませんが、人命価値の貨幣化手法として、将来の収入額に基づいて収入額を現在価値に変換する方法もある<sup>9)</sup>。また、投資に対する人命損失の社会的価値として、人命損失に伴う地域内総生産 GRP の損失として経済的に評価をしている方法もある<sup>10)</sup>。本研究では、人命 1 人の損失回避に要する投資額として人命被害回避費用を定義して、施設導入に関わる一つの目安として用いた。

## 2. 費用対効果算定法の提案

### 2.1 効果算定手法の流れ

地震火災被害想定的手法<sup>11)</sup>を参考とし、システム導入による被害軽減効果の算定手法を図 1 のように構築する。まず、消防隊到着時の延焼規模を算定した後、それら火災の必要消火水量を算定する。この水量が周辺部に存在する水利の合計水量で賄うことができるならば、その火災地域に対する消防専用水道システム構築の効果はないと考える。消防専用水道システムがあった場合には消火可能と仮定として、システム導入による被害軽減効果は最終火災被害から消防隊到着時の火災被害を引いた値と定義する。各火災における被害軽減効果を合計したものが、導入地域内における被害軽減効果となる。消防隊到着時間の設定方法と必要消火水量の算定方法、周辺の消火水量の考え方については、以下のとおりである。

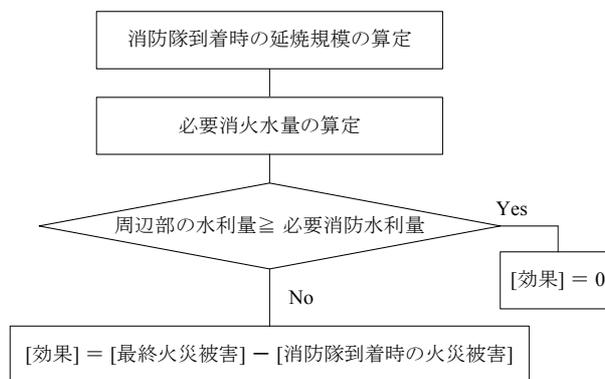


図 1 被害軽減効果算定の流れ

### 2.2 消防隊到着時間の設定方法

消防隊到着時間を設定するために兵庫県南部地震における火災の出火から覚知までの時間を分析した結果、図 2 が得られた。ここで、出火から覚知までの時間が 50 分を超える火災記録<sup>12)</sup>では消防が対応できず覚知前に火災の勢いが収まっている場合が多いため、それらの火災は考慮していない。消防隊が火災を覚知してから現場へ到着して放水を開始するまでの時間は通常火災なら 5 分程度<sup>13)</sup>であることから、地震時の道路混雑を考慮してその時間を 10 分と仮定すると、発生した火災の 61%が 20 分、28%が 40 分、11%が 60 分で放水を開始すると設定できる (表 1)。

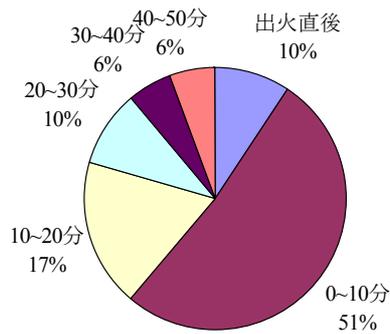


図2 兵庫県南部地震時における火災の出火から覚知までの時間

表1 発生した火災に対する消防隊放水開始までの時間設定

消防隊到着時間	割合
20分	61%
40分	28%
60分	11%

### 2.3 必要消火水量の算定手法

火災延焼規模は東京消防庁による算定式<sup>97</sup>を用いて風速および耐火造率をパラメータとすれば、図3に示すように算定できる。さらに、消防隊到着時の火災周長から式(1)を用いて、その火災に必要な消火水量を算定する。式(1)は東京消防庁<sup>15</sup>が過去の消防活動の記録を基にして、消防ホース1口あたり0.6 m<sup>3</sup>/minの放水を20分間行い、ホース1口あたりの担当幅が15mであるとして求められた式である。

$$Q_n = 0.6 \times 20 \times S / 15 = 0.8S \quad (1)$$

ここに、 $Q_n$ ：必要消火水量(m<sup>3</sup>)、 $S$ ：火災周長(m)

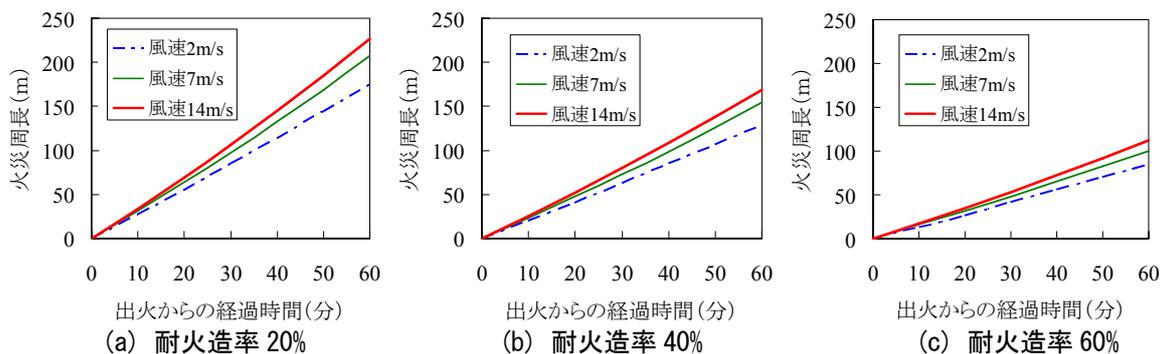


図3 風速、耐火造率別出火からの経過時間に応じた火災規模<sup>14</sup>

### 2.4 既存消防水利の検証

既存消防水利については、人工水利である水道消火栓と防火水槽とを検討する。

#### (1) 水道消火栓

上水道管路に設置されている水道消火栓が地震発生時に使用可能であるかを分析する。そのためには、まず、地震による水道配水管および給水管の被害を予測する。次に、その被害による配水区毎の漏水量を推定し、消火栓への影響を算定する。まず、水道配水管の被害を推定するために、式(2)、(3)に示す著者ら<sup>16</sup>の管路被害予測式を用いる。当該予測式では、地震動から推定される標準被害率 $S_d$ (件/km)に管種、口径、液状化の程度に関する補正係数 $C_p$ 、 $C_d$ 、 $C_l$ (表2)を乗じることで被害率 $S_i$ (件/km)が算出される。標準被害率 $S_d$ は、地表面最大速度 $PGV$ (kine)から推定される。

$$S_i = S_d \times C_p \times C_d \times C_l \quad (2)$$

$$S_d = 1.30 \times 10^{-5} \times PGV^{2.13} \quad (3)$$

表 2 管路被害予測式における補正係数<sup>16)</sup>

管種(継手)	$C_p$	口径(mm)	$C_d$	液状化の程度	$C_l$
DIP(S,SII,NS)	0	75	1.6	なし( $0 \leq PL \leq 5$ )	1.0
DIP(A,K)	0.3	100-150	1.0	部分的( $5 < PL \leq 15$ )	1.4
CIP	1.0	200-250	0.9	全体的( $15 < PL$ )	1.7
VP	0.3	300-450	0.7		
SP	1.0	500-600	0.5		
SGP(ねじ継手)	4.0				
ACP	2.5				

一般的に、想定地震における地震動強さの分布は、震度で示されている場合が多い。その場合は、式(4)に示す内閣府<sup>11)</sup>が示す下式を用い、気象庁震度 $I$ を地表面最大速度 $PGV$ に変換する。

$$I = 2.4 + 2.02 \log PGV \quad (4)$$

次に、給水管の被害を予測する。本研究では、兵庫県南部地震における神戸・阪神域（神戸市6区、尼崎市、西宮市、伊丹市、宝塚市）の建物全壊率<sup>12)</sup>と給水管被害率（給水管被害件数<sup>17)</sup>を建築棟数で除した値）との関係（図4）から給水管被害数を誘導する。神戸市水道局における給水管被害件数はセンター別（東部・中部・西部）に集計されているので、それに対応する建物被害を行政区別の建物被害から算出した。また、芦屋市では他の地域に比べてPE管が多く埋設されており、被害が小さかったことから、芦屋市のデータは省いた。本図から、関係式は次式で表すことができる。

$$Y = 0.187 \ln(X) + 0.97 \quad (5)$$

ここに、 $Y$ ：給水管被害率（ $=$ [給水管被害件数]/[建築棟数]）、 $X$ ：建物全壊率（ただし、 $X \leq 0.56\%$ のとき $Y = 0$ とする）

内閣府の地震被害想定支援マニュアル<sup>11)</sup>では、長谷川ら<sup>18)</sup>の手法に基づき、建物を木造・非木造建物の構造形式と建設年により分類し、地表面最大速度により建物全壊率を算定する方法を採用している。本手法を用い、式(4)の関係式から、表3に示す建物全壊率算定表を導いた。

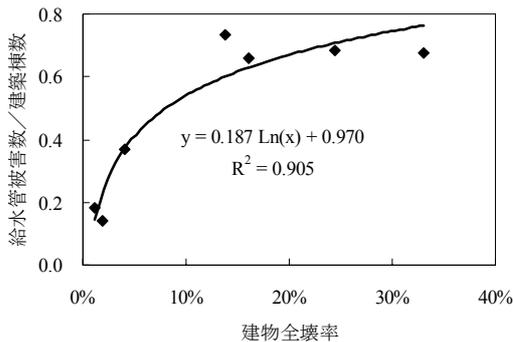


図 4 給水管被害率と建物全壊率との関係

表 3 気象庁震度階による建物全壊率算定表<sup>11), 18)</sup>

震度	PGV (kine)	木造建物全壊率			非木造建物全壊率	
		昭和46年 以前	昭和47～ 56年	昭和57年 以降	昭和56年 以前	昭和57年 以降
7	107	28%	16%	4%	5%	2%
6強	81	18%	9%	2%	3%	1%
6弱	46	2%	1%	0%	0%	0%
5強	26	0%	0%	0%	0%	0%
5弱	15	0%	0%	0%	0%	0%

簡便に地震時の管路被害件数から漏水量を算定するため、本研究では兵庫県南部地震における水道配水管および給水管の被害と配水池の水位・水量変動とを分析した。兵庫県南部地震における地震直後の配水池からの配水量を漏水量とみなし、配水区域における時間当たりの漏水量は、兵庫県南部地震時の配水池の水位、入水量データ<sup>19)</sup>から次式により推定される。

$$Q = Q_1 + V/T \quad (6)$$

ここに、 $Q$  : 時間当たりの漏水量( $\text{m}^3/\text{h}$ )、 $Q_i$  : 配水池への入水量( $\text{m}^3/\text{h}$ )、 $V$  : 地震直前の配水池貯留量( $\text{m}^3$ )、 $T$  : 地震発生から配水池の水位が 0 となるまでの時間(h)

以上の方法により、神戸市街地の 43 配水区において、漏水量を目的変数、配水管被害件数および給水管被害件数を説明変数として重回帰分析を行った。本分析の重相関係数は 0.894 であり、精度よい分析ができた。得られた関係式(7)より管網からの漏水量を推定できる。

$$Q = 15.2D_d + 0.224D_f \quad (7)$$

ここに、 $Q$  : 時間当たりの漏水量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )、 $D_d$  : 配水管被害件数、 $D_f$  : 給水管被害件数

次に、地震時に消火栓が使用できなくなる原因としては、2つのケースが考えられる。一つは水道管路の被害からの漏水によって配水池の水位が 0 となり、配水区全域において水量・水圧が失われるケースである。他は、被害点の下流に位置する地域や被害の多く発生した地域等において、給・配水管からの大量漏水により局所的に消火栓が使用できなくなるケースである。前者については、推定した漏水量により配水池の水位変動を予測することで、消火栓の使用可能性を評価することができる。すなわち、式(6)を用いることで「水位が 0 となるまでの時間」を算出することができ、水位が 0 となった時点で、消火栓の水は使用できなくなる。逆に、配水池への入水量が漏水量を上回っておれば、その配水区域内の消火栓の水を使用できる可能性は高いといえる。後者については、不確定な要素が多く、管路の被害分布および被害状況を詳細に予測し、また配水ルート等を考慮した分析が必要である。

## (2) 防火水槽

兵庫県南部地震において神戸市内に設置されていた 968 基の防火水槽うち 90 基 (約 10%) の躯体・採水管に被害があった。このほか、倒壊家屋等が障害となって使用できなかった防火水槽もあった<sup>12)</sup>。したがって、想定地震における地震動強さが兵庫県南部地震のように震度 6 強~7 であれば、防火水槽の被害は 10%程度と仮定することも一つの方法である。

## (3) 出火点周辺部の消防水利の考え方

算定した必要消火水量と周辺部の消防水利量を比較することにより、消火可能性評価を行なう。消防水利の基準<sup>20)</sup>では、防火対象物と消防水利との距離 140m 以下という値が規定されている。そこで、出火点から半径 140m 以内にある消防水利の合計水量を周辺の消防水利量とする。予め導入地域内の既存消防水利を調査しておけば、1 火災における平均周辺消防水利量は次式により算出できる。

$$Q_r = 140^2 \pi / A \times Q \quad (8)$$

ここに、 $Q_r$  : 火災周辺部の消防水利量( $\text{m}^3$ )、 $Q$  : 導入地域内の総消防水利量( $\text{m}^3$ )、 $A$  : 導入地域の面積( $\text{m}^2$ )

## 2.5 費用対効果分析による事業評価手法

費用対効果分析では、評価期間 (50 年以下) を設定し、その期間中の費用と効果を比較することが一般的である。総費用は、更新時期、割引率を固定して提案されている換算係数<sup>5)</sup>を用いることで、簡便に総費用を算出することができる。

$$C = C_0 K_c \quad (9)$$

ここに、 $C$  : 総費用、 $C_0$  : 事業費、 $K_c$  : 換算係数

費用対効果分析の手法は種々存在するが、消防専用水道システムの費用対効果分析においては、代替費用法と量-反応法が適用できる。以下に、両手法について述べる。

### (1) 代替費用法による分析

代替費用法とは、消防専用水道システム導入事業に関わる総費用と同等の効果が得られる代替案の総費用との比較を行なう手法である。代替案として2つの事業を考える。一つは、既存の水道管を耐震化する案、他は耐震性防火水槽を設置する案である。

全国の水道管路の内、基幹となる配水管の耐震化率でも14%程度であり、予算・工期の面でも配水管を耐震性のある管路に更新するのは実際上難しい。しかし、消防専用水道システム導入費用との比較のために、仮に既存配水管を耐震化できた場合の費用を考える。既存水道管の耐震化事業の基本的な考え方として、給配水管ともに耐震化を行う。これには、過去の地震で給水管に被害が生じて水圧が低下し、消火栓が使用できなくなった事例も考慮している。非耐震配水管の耐震化と給水管の耐震化または遮断弁等設置によって地震時に許容の漏水量以下となる場合の費用を算定する。配水管を耐震化すれば、地震時の消防用水だけでなく生活用水も確保できるなどの様々な便益が生じるが、消防専用水道システムの導入も日常時の雑用水や漏水対策を行う上でも便益が見込まれる。そこで、本研究では必要消防用水のみを確保することを目的としてシステム導入費用と既存水道管路の耐震化費用のみを比較する。

次に、耐震性防火水槽の設置事業では、100 m<sup>3</sup>耐震性防火水槽と本システムにおける消火栓1基とを同等の効果であるとして、本システムの消火栓数を設置するのに要する費用を算定する。これらの費用と消防専用水道システムの建設費用とを比較して事業の優位性を評価する。

### (2) 量－反応法による分析

量－反応法とは、ある想定地震のもとで本システムが導入された場合に、導入されていない状態の火災被害に対して軽減された火災被害を効果として、導入による効果の度合いを評価する方法である。貨幣換算が容易なものとして建物被害、貨幣換算が困難なものとして人的被害がある。建物被害については、式(10)により費用便益比 $B/C$ を算定することができる。建築統計年報<sup>21)</sup>より木造建物1棟あたり0.2億円、非木造建物1棟あたり1.74億円として被害額を算定する。人命価値の貨幣化手法として、将来の収入額に基づいて、収入額を現在価値に変換する方法があるが<sup>9)</sup>、一般的には、人的被害の軽減効果について便益算入は行われていない。ただし、火災による人的被害軽減の効果を示すことは、システム導入のインセンティブを与えることにつながる。そこで本研究では、人命1人の損失回避に要するコストを人命被害回避費用と定義してこの指標を用いる。これは、式(11)を用いて算定できる。これらの指標を総合して事業評価を行うことが適切である。

$$B/C = \frac{\nu M_S}{C_0 K_C} \quad (10)$$

$$E_H = \frac{C}{\nu M_H} = \frac{C_0 K_C}{\nu M_H} \quad (11)$$

ここに、 $B/C$ ：費用便益比、 $E_H$ ：人命被害回避費用（人命1人の損失回避に要するコスト）、 $\nu$ ：地震発生確率（期間50年）、 $M_S$ ：建物被害軽減額、 $M_H$ ：人的被害軽減効果(名)、 $C_0$ ：事業費用、 $C$ ：総費用、 $K_C$ ：換算係数

## 3. 費用対効果算定法の神戸市専用消火システムの適用事例

### 3.1 神戸市域における消防専用水道システムの導入と想定地震火災

消防専用水道システムの事業モデルとして、著者らが別途検討して提案したもの<sup>22)</sup>を使用する。これは、神戸市域の市街地構造などの地域特性に防災施設の立地状況を加えて地震火災被害に影響を及ぼす地域の特定を行い（図5）、その地域周辺の有効な水源を利用して詳細設計されたもの（図6）である。建設費用は108億円と見積もられている。

一方、神戸市地域防災計画<sup>23), 24)</sup>によると、今後、神戸市に影響を与える可能性がある大規模地震として7つの地震が想定されている。そのうち、最も大規模な火災被害が発生すると想定されている地震

は内陸型有馬高槻構造線～六甲断層帯地震（以下、有馬高槻地震とよぶ）である。この有馬高槻地震では、焼失棟数 42,924 棟、火災による死者 2,192 名の被害が予測されている。兵庫県南部地震での神戸市における火災被害が、焼失棟数 6,814 棟、火災による死者 529 名<sup>17)</sup>であったことを考えると兵庫県南部地震の数倍の火災被害となる。

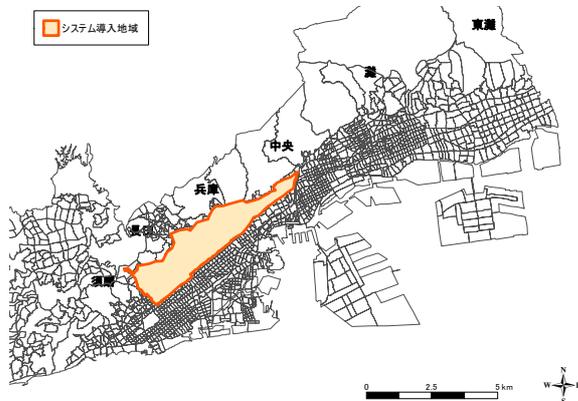


図 5 消防専用水道システムの導入地域<sup>22)</sup>

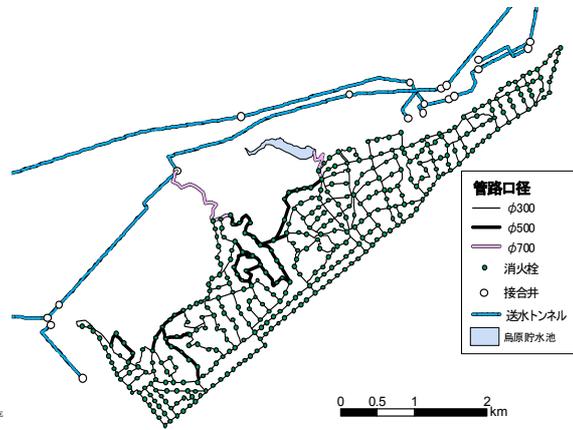


図 6 消防専用水道システムの口径別管網図<sup>22)</sup>

### 3.2 既存消防水利の検証

#### (1) 水道消火栓の使用可能性

システム導入地域は鳥原高層、天神中層、会下山中層、奥平野中層、奥平野低層の 5 つの配水区域の大半を包含している。また、想定地震における地震動分布<sup>24)</sup>によると、導入地域では震度 6 弱～7 となっている。まず、給配水管の被害については、2.4 で示した手法を用いて推定した。ここで、構造・年代別による 5 つの区分における建築棟数は、神戸市における行政区別の建築統計データ<sup>21)</sup>を用いている。さらに、式(7)より気象庁震度階に応じた配水区ごとの漏水量を算定した（表 4）。各配水地とも震度 6 弱以下ではほとんど漏水は発生しないが、震度 6 強以上となれば一気に漏水量が大きくなる。

次に、推定漏水量を用いて水道消火栓の使用可能性を検証する。システム導入地域に対応する 5 つの配水池の水位、入水量、配水量変動データ<sup>19)</sup>から、推定漏水量が発生した場合の水位変動を求めて、「水位が 0 となるまでの時間」を表 5 に示すとおり算定した。奥平野中層配水区においては、配水池を経由せず送水トンネルから管網へ入水量 1,300(m<sup>3</sup>/h)で直接送水を行っているが、震度 6 強、7 における漏水量はこれを上回る値であることから、地震直後消火栓が使用できなくなると推測できる。また、天神中層配水池では、貯留量、入水量が配水区の規模に比べ大きいため、水位が 0 となるまでの時間に余裕があり、消火栓を使用できる可能性は高い。その他の 3 つの配水区については、震度 6 強以上の地震において 1～2 時間で配水池の水位は 0 となるが、地震直後の 1～2 時間以内は場所によっては消火栓が使用できる可能性はある。しかし、有馬高槻地震において導入地域では震度階が 6 弱～7 と推定されているので、水道消火栓はほとんど使用できないものと考えられる。

表 4 各配水区における漏水量算定結果

震度	鳥原高層	天神中層	会下山中層	奥平野中層	奥平野低層
7	2,153	922	4,178	1,715	7,149
6強	1,697	715	3,234	1,319	5,577
6弱	2	3	16	9	19
5強	2	3	16	9	19
5弱	1	1	5	3	6

単位:m<sup>3</sup>/h

表 5 各配水池における水位が 0 となるまでの時間

震度	水位0となるまでの時間(h)				
	鳥原高層	天神中層	会下山中層	奥平野中層	奥平野低層
7	1.2	16.2	1.2	0.0	1.4
6強	1.6	236.5	1.7	0.0	1.9
6弱	—	—	—	—	—
5強	—	—	—	—	—
5弱	—	—	—	—	—

## (2) 消火栓を除く消防水利

兵庫県南部地震後、神戸市では震災復興の一環として防火水槽の整備が進められてきた。震災前には38基あった100m<sup>3</sup>耐震性防火水槽は2005年現在で248基に増えている<sup>25)</sup>。防火水槽は、地震時においてもほとんどが使用できる貴重な消防水利である。想定地震時における水道消火栓の使用可能性は低く、防火水槽が有効な消防水利となり得る。システム導入地域内の水道消火栓を除く消防水利量を表6に示す。指定消防水利とはプールや企業の保有する水槽などの水利である。公設の防火水槽は83基設置されており、その合計水量は約5,600m<sup>3</sup>である。水道消火栓を除く総消防水利量は約13,600m<sup>3</sup>となる。

表6 導入地域内の消防水利量<sup>25)</sup>

	公設防火水槽容量 (基数)	私設防火水槽容量 (基数)	指定水利容量 (基数)
中央区	498m <sup>3</sup> (7基)	140m <sup>3</sup> (2基)	852m <sup>3</sup> (4基)
兵庫区	2,286m <sup>3</sup> (34基)	80m <sup>3</sup> (2基)	2,609m <sup>3</sup> (13基)
長田区	2,810m <sup>3</sup> (42基)	280m <sup>3</sup> (4基)	4,089m <sup>3</sup> (13基)
全域	5,594m <sup>3</sup> (83基)	500m <sup>3</sup> (8基)	7,550m <sup>3</sup> (30基)
	13,644m <sup>3</sup> (121基)		

### 3.3 システム導入による被害軽減の算定

出火・延焼算定に関わるパラメータを表7に示す。出火に関わるパラメータとして、地震が発生する季節と時刻についてそれぞれ3ケースを設定した。発生時刻は、1時(時刻係数 = 0.42)で出火件数をもっとも少なく、17時(時刻係数 = 1.42)で最も多くなる。12時(時刻係数 = 1.00)では平均的な出火件数となる。火災延焼にかかわるパラメータとして、風速について3ケース、耐火造率について2ケースを設定した。ここで、神戸市の年平均風速は2m/s、最大風速は14m/sである<sup>26)</sup>。導入地域の耐火造率が明らかではないため、非木造率にあたる60%とそれよりも少し低めの40%を設定した。ここで、耐火造と非木造は同じではない。耐火造の建物は燃えることはなく、耐火造の建物がいくつか並立していれば、火災は焼け止まる。

表7 出火・延焼に関わるパラメータの設定

項目		ケース
出火にかかわるパラメータ	発生季節	春・秋, 夏, 冬の3ケース
	発生時刻	1時, 12時, 17時の3ケース
火災延焼にかかわるパラメータ	風速	2m/s, 7m/s, 14m/sの3ケース
	耐火造率	40%, 60%の2ケース

地震被害想定支援マニュアル<sup>11)</sup>を基に、まず木造建物全壊率および非木造建物全壊率を算定した。次に、木造建物および非木造建物からの出火件数<sup>27), 28)</sup>の算定方法を用いて導入地域内の出火件数とした。出火件数の算定結果を表8に示す。

表8 出火件数の予測結果

春・秋			夏			冬		
1時	12時	17時	1時	12時	17時	1時	12時	17時
3	7	10	2	4	6	4	9	13

2. で設定したように、消防隊の放水開始時間は火災の61%が20分、28%が40分、11%が60分とした。各火災に投入可能な消防車数および消防隊数に制限はないとし、発生した火災すべてにおいて消防活動

が行われるものと仮定した。消防能力に制限がないと仮定することは、効果を小さく評価することになるのでこの仮定を設けている。火災地域周辺部の消防水利は表6の防火水槽のみを考慮した。なぜなら、震度6強、7の地震では配水池の水位は1~2時間で0となるので、有効な消火栓の場所を予測することは極めて難しい。また、兵庫県南部地震のように水位が0となるまでの間においても、配水ルート上の管路被害等により多くの消火栓が使用不可能となる。

表6より導入地域内の消防水利量は13,600 m<sup>3</sup>であるが、前述のように防火水槽の10%に被害が発生するとすれば、消防水量は12,240 m<sup>3</sup>となる。さらに、導入地域の面積は約10km<sup>2</sup>であるから、式(8)を用いると火災周辺部の消防水利量は約75 m<sup>3</sup>となる。

耐火造率と風速の各ケースにおけるシステム導入前後の被害推定と導入による被害軽減数（導入前後の被害の差分）を表9にまとめて示す。ここでは、季節および出火時刻による事象確率がそれぞれ一樣にあるとして、出火ケースをすべて考慮して推定したあと、それぞれのケースの被害を平均して被害推定としている。出火被害が大きくなるケース3では被害軽減数も大きくなる。ケース4~6では、被害の低減はほとんどみられず、建物被害では0~26億円、人的被害では0~3名が低減した。一方、ケース1~3では建物被害で54~652億円、人的被害で7~81名低減している。

表9 システム導入前後による被害推定と導入による被害軽減

ケース	耐火造率(%)	風速(m/s)	システム導入前の被害推定			システム導入後の被害推定			システム導入前後の被害軽減		
			焼失数(棟)	建物被害(億円)	死者(人)	焼失数(棟)	建物被害(億円)	死者(人)	焼失数(棟)	建物被害(億円)	死者(人)
1	40	2	79.7	89.5	11.2	31.7	35.6	4.4	48.0	54.0	6.7
2		7	378.3	425.2	53.0	39.0	43.8	5.5	339.3	381.4	47.5
3		14	623.7	701.0	87.3	43.7	49.1	6.1	580.0	651.9	81.2
4	60	2	13.8	15.5	1.9	13.8	15.5	1.9	0.0	0.0	0.0
5		7	29.8	33.5	4.2	17.8	20.0	2.5	12.0	13.5	1.7
6		14	41.2	46.3	5.8	18.5	20.8	2.6	22.7	25.5	3.2

また、システム導入により被害が軽減できた割合を被害軽減率と定義して、出火季節・時刻、耐火造率、風速を変化させた全54ケースについて、被害低減率を算定した結果を図7に示す。図の横軸はシステム導入前の被害を示しており、建物被害が150億円以上、人的被害が20人以上出るような火災被害に対しては、システム導入による被害軽減率も大きくなる。小規模の火災であれば、既存の消防水利を用いても消火できるためシステム導入による効果は現れにくい。

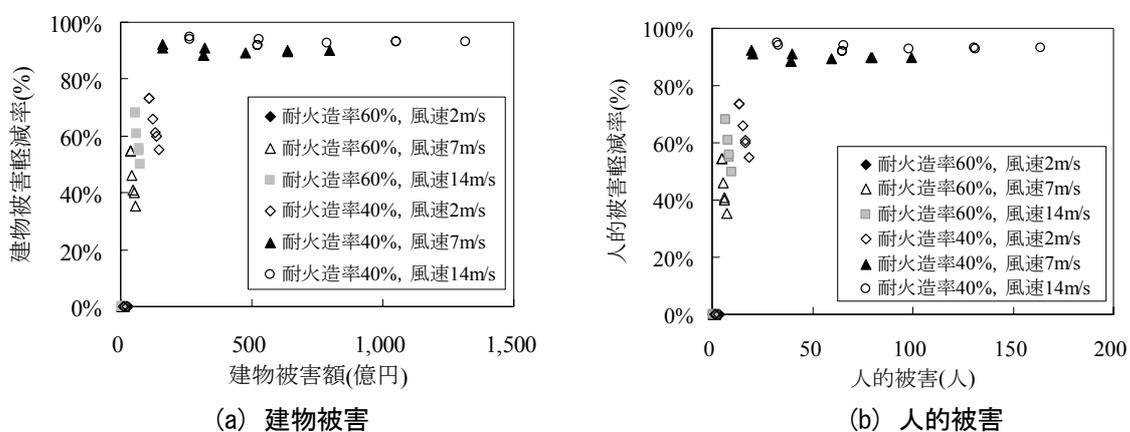


図7 システム導入による被害軽減率

### 3.4 費用対効果分析

#### (1) 総費用の算定

総費用は、評価期間を50年として導入初期にかかる事業費に換算係数を乗じて、表10に示すとおり算定した。換算係数は水道施設ごとに値が算定されたものである<sup>5)</sup>。総費用は127.6億円となった。

表10 消防専用水道システム導入事業における総費用の算定結果

システム構成	項目	耐用年数(年)	費用(億円)	換算係数	総費用(億円)
ポンプ(60m), φ300, φ500, φ700	配水管・配水管付属設備	38	102.6	1.13	115.9
	ポンプ施設	15	6.0	1.94	11.6
	合計	—	108.6	—	127.6

#### (2) 代替費用法による分析

本システムの代替案として、前述のように既存水道管路耐震化事業と耐震性防火水槽設置事業を挙げる。既存水道管路の耐震化事業では、まず導入地域内の配水管をすべて耐震管路に替えて、その他の被害軽減を給水管の耐震化で調整する方策をとる。配水管の耐震化の方策には、優先順位をつけて一部だけ耐震化をする、または段階的に耐震化をすることも考えられる。しかし、消火栓での水圧を確保するには配水管とともに給水管の被害軽減も考慮しなければならない。そこで、総費用を最小にする方策として、配水管を全て耐震管路に替え、給水管の耐震化費用を最小化する方策を採用する。耐震管路は耐震継手を有するダクタイル鋳鉄管(耐震ランクA)とし、耐震継手を持たないダクタイル鋳鉄管(耐震ランクB)およびその他の非耐震管路(耐震ランクC)の敷設替えに要する費用を算定する。建設単価1億円/km<sup>5)</sup>として算定した結果を表11に示す。すべての配水管を耐震管にするためには152.3億円が必要である。さらに換算係数を用いて評価期間50年での総費用は172.1億円となる。消防専用水道システム導入事業の総費用127.6億円の1.3倍である。さらに、給水管の被害も軽減させる必要がある。漏水量が配水池への入水量よりも小さくなれば、理論的には消火栓は機能するので、式(7)を用いて漏水量<入水量の関係より、許容できる給水管の被害件数は表12に示すとおりに算出される。地震時に消火栓を機能させるためには、少なくとも48,000件の給水管の被害を軽減させなければならない。仮に、一件あたりの給水管が5mあるとすれば、90,000円/m×5m×48,230件×1.1(換算係数)で238.7億円となり、配水管の耐震化を大きく上回ることになる。既存水道管路を耐震化するには、合計391億円(システム導入費用の2.27倍)が必要である。本研究ではいくつかの仮定を設けているが、地震時の消防水利の確保対策としては、消防専用水道システムを整備したほうが効果的であるといえる。

表11 既存水道配水管の耐震化事業費用

耐震ランク	敷設延長(km)	管路耐震化費用(億円)	換算係数	総費用(億円)
A	23.2	—	—	—
B	113.3	113.3	1.1	128.0
C	39.0	39.0	1.1	44.1
合計	175.5	152.3	1.1	172.1

表12 水道給水管の耐震化必要件数

許容給水管被害件数	19,286
給水管被害件数予測値(震度7)	67,516
給水管耐震化必要件数	48,230

次に、耐震性防火水槽設置事業を代替案として考える。本システムの消火栓は110m~160mの範囲<sup>22)</sup>に設置されている。一方、3.3で対象地域の火災周辺部の消防水利量は約75m<sup>3</sup>と算出されていることから、必要水利消火栓1基の効果は100m<sup>3</sup>耐震性防火水槽1基の効果と同等であると仮定した。本システムの消火栓数は405基である。また、100m<sup>3</sup>耐震性防火水槽の設置費用は2,000万円であり、換算係数は1.59である<sup>5)</sup>。100m<sup>3</sup>耐震性防火水槽の設置費用の算定結果を表13に示す。費用は81.0億円となり、評価期間50年での総費用は128.8億円となった。消防専用水道システム導入の総費用は127.6億円であり、

総費用の比は 1.01 となった。これは、システム導入事業と代替事業の効果がほぼ同値であることを意味している。しかし、火災被害が想定以上に大きい場合、防火水槽の水が空になっても、本システムは継続的に水を供給することができるので、優位であることは言うまでもない。このことから、消防専用水道システムの導入事業は、代替案と同等またそれ以上の効果が期待できると考えられる。

表 13 耐震性防火水槽の設置事業費用

基数	費用(億円)	換算係数	総費用(億円)
405	81.0	1.59	128.8

### (3) 量－反応法による分析

評価期間を 50 年として、量－反応法による費用対効果分析をおこなう。式(10)、(11)を用いて、建物被害のみの費用便益比  $B/C$  と人命被害回避費用  $E_H$  を算定する。有馬高槻地震の 50 年以内の地震発生確率は 2% である<sup>29)</sup>。この地震発生確率を表 9 の被害軽減数に乗じて、評価期間 50 年における効果を導く。建物被害のみによる  $B/C$  は、もっとも大きな値のケース 3 においても 0.10 (=被害軽減額 651.9 億円×地震発生確率 0.02/総費用 127.6 億円) で、かなり低い値である。また、人的被害回避費用  $E_H$  は、もっとも値の小さいケース 3 で 78.6 億円 (=127.6 億円 / (81.2 人×0.02)) となる。有馬高槻地震が発生すればシステム導入による被害軽減はみられるが、現状では、その地震発生確率が低いことから、神戸市に本システムを導入してもあまり効果が得られないといえる。

そこで、ケース 3 を例に挙げ、地震発生確率を変化させた場合の費用対効果の変化をみる。システム導入費用と建物被害軽減額から、 $B/C=1.0$  となりうるのは 19.6% (=127.6 億円 / 651.9 億円)、つまりに地震発生確率が 20% を超えるような場合において、システム導入による効果が得られる。また、このとき人的被害回避費用は約 7.8 億円となる。1 人の人命を数億円で助けることができるというのであれば、決して無駄な投資であるとは言えない。ただし、地震活動間隔が 900-2800 年とされており、ポアソン確率に基づいて今後 50 年の発生確率をみても 5% 程度であり、20% を超えることは難しい。大規模な地震が 50 年以内で 20% を超えるような確率で発生することが予想される場合、本地域に消防専用水道システムを導入すれば十分な費用対効果を得られる。

最後に、町全体での防災区画化・耐震化など、色々な対策が考えられている中で、現実に行える施策の中の一つとして消防専用水道システムの導入を提案した。本研究で用いた換算係数は水道事業者が実務で費用便益分析を行う際によく使用されている係数を用いた。換算係数の値によっては、本研究の便益が逆転することもありうる。実際に費用便益の中で使用される場合は、割引率や施設の供用年数などを配慮して検討されるべきである。

## 4. まとめ

本研究では、想定地震時における延焼程度から算出される必要消火水量と消防専用水道システムによる消火水量、または既存水道管路・施設の被害を考慮した消火水量とを比較することにより、システム導入による火災被害を算定し、システム導入に関わる費用対効果算定方法を提案した。また、神戸市に本システムを導入する場合を例に挙げ、構築したシステムの導入効果算定手法を適用した。

- 上水管路・施設の被害を考慮した消火水量は、兵庫県南部地震における配水池水位、水道管被害記録から推定する手法を提案した。
- 導入効果の算定において、消防隊到着時から火災鎮火時までの建物焼損数を用いて貨幣換算した建物被害額と、人命 1 人の損失回避に要するコストとして人命被害回避費用の二つの指標を提案した。
- 想定される有馬高槻構造線～六甲断層帯地震では、配水管、給水管の被害が甚大で既存の水道消火栓を使用できない可能性が高いことが知られた。

- 有馬高槻構造線～六甲断層帯地震の地震が発生する場合、消防専用水道システムを導入することによって、建物被害 652 億円、人的被害 82 名が軽減できることが推定できた。
- 消防専用水道システムの導入事業と既存水道管路耐震化および防火水槽設置の代替事業とを比較した結果、本システムの導入は代替事業よりも効果的であることが分かった。
- 量一反応法によって費用対効果分析をおこなった結果、もっとも効果の高いケースでも、建物被害の B/C が 0.10、人的被害回避費用が 78.6 億円と、十分な費用対効果は期待できなかった。しかし、地震発生確率が 20%を超える場合では、建物被害の費用対効果は 1.0 以上になり、人的被害回避費用 7.8 億円で人ひとりを助けることができることがわかった。

## 謝辞

本論文の作成に当たり、貴重な資料を提示して頂きました福田裕繁氏、松下眞氏、田中孝昌氏をはじめとする神戸市水道局の皆様、心より厚く御礼申し上げます。また、奥村芳彦氏をはじめとする神戸市消防局の皆様には、貴重なデータを提供して頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 高田至郎、勤息義弘、鍛田泰子：火災延焼による人的被害波及と水道消火栓機能、日本地震工学会論文集、第 5 巻第 2 号、pp.1-15、2005 年。
- 2) 木俣昇、二神透：防災緑地網整備計画支援のための火災延焼シミュレーション・システムの開発、土木学会論文集、No.449/IV-17、pp.193-202、1992 年。
- 3) 小林正美：サンフランシスコ市の地震災害と都市の安全設計の思想、日本都市計画学会学術研究発表会論文集、25 号 120 番、pp.715-720、1990 年。
- 4) 大窪健之：「環境防災水利」への試み ―バンクーバー市の海水利用システム (DFPS) ―、NPO 法人災害から文化財を守る会情報ネット、2002 年 2 号、pp.8-12、2002 年。
- 5) 日本水道協会：水道事業の費用対効果分析マニュアル(案)〈改訂版〉、2004 年。
- 6) 前田修一、秋吉卓、淵田邦彦、日野章：ライフラインの耐震化費用と信頼性の関係について、土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部、53 巻、1998 年、842-843。
- 7) 朱牟田善治、石田勝彦、当麻順一：費用便益分析による変電設備の耐震補強計画法、土木学会論文集、584 巻/I-42 号、1998 年、215-228。
- 8) 松下智美、村上博哉、谷口靖博：配水間事故未然防止の観点から見た小口径管の改良優先度の決定に関わる一手法、第 56 回全国水道研究発表会、2005 年、pp.76-77。
- 9) 国際協力事業団社会開発調査部：開発調査における経済評価手法研究 ―14.地震防災―、2002 年。
- 10) 河田恵昭、柄谷友香：大規模な人命の損失に伴う間接被害の定量的評価、比較防災学ワークショップ、No.2、2002 年、7pages。
- 11) 内閣府：地震被害想定支援マニュアル、<http://www.bousai.go.jp/manual/index.htm>、2006 年。
- 12) 日本火災学会：1995 年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書、1996。
- 13) 堀内三郎、保野健治郎、室崎益輝：新版 建築防火、朝倉書店、pp.179-235、1999 年。
- 14) 東京消防庁 火災予備審議会：直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策、pp.33-59、1997 年。
- 15) 東京消防庁警防部：近代消防戦術第 2 編 大火災と消防、1983 年
- 16) 高田至郎、藤原正弘、宮島昌克、鈴木泰博、依田幹雄、戸島敏雄：直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究、水道協会雑誌、第 798 号、pp.21-37、2001 年。
- 17) 関西ライフライン研究会：ライフライン地震防災シンポジウム 阪神・淡路大震災に学ぶ、pp.141-170、1997 年。
- 18) 長谷川浩一、翠川三郎、松岡昌志：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測、日本建築学会構造系論文集、第 505 号、pp.53-59、1998 年。

- 19) 神戸市水道局：兵庫県南部地震時における水道管被害状況および配水池の状況（内部資料）
- 20) 消防科学総合センター：消防用設備のしくみとはたらき（消防水利編）、1994年.
- 21) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課：建築統計年報、建設物価調査会、2005年.
- 22) 高田至郎、鋤田泰子、勤息義弘：消防専用水道システムの導入手法構築と適用事例、日本地震工学論文集、第7巻、第4号、2007年.
- 23) 神戸市防災会議：神戸市地域防災計画 防災データベース、2005年.
- 24) 神戸市防災会議：神戸市地域防災計画 総括（地震対策編）、2005年.
- 25) 神戸市消防局：消防水利に関する資料（内部資料）
- 26) 神戸市ホームページ（神戸市の統計）：<http://www.city.kobe.jp/cityoffice/06/013/toukei/>
- 27) 神奈川県：神奈川県地震被害想定調査報告書、1986年.
- 28) 名古屋市防災会議地震災害対策部会：名古屋市地震被害想定調査報告書、1997年.
- 29) 地震調査研究推進本部ホームページ：<http://www.jishin.go.jp/main/>

(受理：2006年7月4日)  
(掲載決定：2007年4月2日)

## **Cost-Effectiveness Analysis for Installing Dedicated Water Supply System for Firefighting**

TAKADA Shiro<sup>1)</sup>, KUWATA Yasuko<sup>2)</sup> and GONSOKU Yoshihiro<sup>3)</sup>

1) Member, Professor, Kobe University, Dr. Eng

2) Member, Associate professor, Kobe University, Dr. Eng

3) Graduate student, Kobe University

### **ABSTRACT**

Present paper shows a method to analyze cost-effectiveness for installing the new system. In this method, comparing firefighting water required for burned area under the scenario of an earthquake with water capacities before and after the system install, the burned damage reduced by the system is estimated. This method is applied to the area in Kobe City as a case study. The result of case study shows that if the large fire following the earthquake occurs with high possibility, effectiveness of the system install can be verified.

*Key Words: earthquake, fire, dedicated water supply system, cost effectiveness*