



消防専用水道システムの導入手法構築と適用事例

高田至郎¹⁾、楯田泰子²⁾、勤息義弘³⁾

- 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

本稿では地震などの緊急時の消防水利を確保するための消防専用水道システムの導入方法を提案している。まず、火災危険地域の選定や必要消火用水量の算定を行い、次いで管網計算を用いて水利的信頼性・経済性を考慮したシステムの構築方法を示している。これらの検討には兵庫県南部地震における火災被害分析データを用いている。さらに本システムを神戸市に導入する場合を例に挙げて手法の具体的適用事例を示すとともに、導入に要する費用を算定している。

キーワード： 地震火災、消防専用水道、導入費用

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。その要因のひとつとして、断水による水道消火栓の機能損失が挙げられる。これは、地震による配水管被害により、配水ルートが断絶しただけでなく、給配水管からの大量の漏水が発生したことによるものである。このような背景から、著者らは兵庫県南部地震において水道管被害による消火栓の稼動不能と火災による人的被害との関係について分析を行った¹⁾。そして、本分析結果から、消火栓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た。

現在、兵庫県南部地震の被害を教訓とし、種々の水道耐震化事業が進められている。技術的進歩により水道管の耐震性はかなり向上しているが、既存の水道管路には経年管が混在しており、耐震的に脆弱な経年管を全て更新するには莫大なコストと長期間を要する。さらに、給水管をすべて耐震化にすることは極めて困難である。

地震時における消防水利に関する研究としては、木俣・二神²⁾による河川を含む緑地帯を防火帯として活用する計画手法の研究や澤田ら³⁾による皇居の壕水活用に関する研究など自然水利を地震防災に活用した研究が挙げられる。また、金沢市を事例とし、用水を消火活動に利用する場合を想定し、取水可能地域の評価を通じて消防力低下地域の予測を試みた高山・飯坂⁴⁾の研究もある。大窪ら⁵⁾は、京都市の疎水型開水路を常時および非常時の消防水利とすることを目標とし、その基本的な整備方針を提案している。また、消防に関わる行政・自治体においても種々取り組まれているが、特に近畿地方整備局河川部を中心とした「阪神疎水構想」⁶⁾は新規に疎水を開削し、防災水利の確保を目指す先進的な構想で

ある。上記研究の大半は既存水利の利用を目指すものであり、先に水利ありきの提案である。一方、阪神疎水構想は画期的なものであるといえるが、阪神地域全体をカバーできる完全な消防水利とは言えない。本研究ではサンフランシスコの AWSS (Auxiliary Water Supply System)^{7), 8)}やバンクーバーの DFPS (Dedicated Fire Protection System)⁹⁾の消防専用水道システムに注目した。これらのシステムは、上水道に設置された消火栓のバックアップシステムとしての機能を有し、地震時などの緊急時の消防水利として導入されたものである。関連する既往研究と本研究との相違は、前者が既存水利の利用に焦点が当てられているのに対し、後者は新たなシステムを導入する点にある。消防専用水道システムは、地震時の消防水利の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、新規導入のために事業費等が大きな課題となる。そこで、本論文では消防専用水道システムの導入手法を構築するとともに、適用事例を示して本システム導入に要するコストを具体的に算定できることを示した。

2. 導入手法の提案

2.1 消防専用水道システム導入の流れ

本章では、消防専用水道システム導入における計画的手法とシステムを構成する施設の設計手法を構築し、システムの導入手順を提案する。消防専用水道システムは上水道施設と類似する点が多いため、上水道施設の設計手法¹⁰⁾を参考とする。消防専用水道システムの導入計画・設計は図1に示す流れで行われる。本システムの導入目的はある都市における地震火災対策であるが、都市全域に同時にシステムを導入することは事業規模から現実的ではない。そこで、地震時の火災に対して被害が大となる地域を特定し、まずは危険と判断された地域から順次導入する合理的な方法が望まれる。歴史的に価値のある建造物や行政的に重要な施設などを対象とすることもありうる。しかし、このような特殊なケースでは、導入する地域は予め決まっている。次に、本システムは、緊急時に対象区域を火災から守り得る消火水量を確保しなければならない。したがって、必要消火水量を満足するような水源の選定が重要となる。水源については上水道のように水質を重要視する必要がないため、配水池・貯水池のほか、河川、湖沼、下水処理場なども考えられる。満足する水源がない場合は、導入する地域を変更するか、新たに貯水槽などを設けるなどの処置が考えられる。

消防専用水道システムの施設設計は上水道施設の設計手法とほぼ同じであるが、本システムの機能には同時多発的火災時における信頼性が求められる。システムの信頼性を向上させるには、耐震管路を使用して管路被害を防ぐこと、多くの消火栓を同時使用したときに管内圧力がある値を下回らないように維持すること、さらに過剰設計とならないように水利的信頼性と経済性を十分に検討する必要がある。

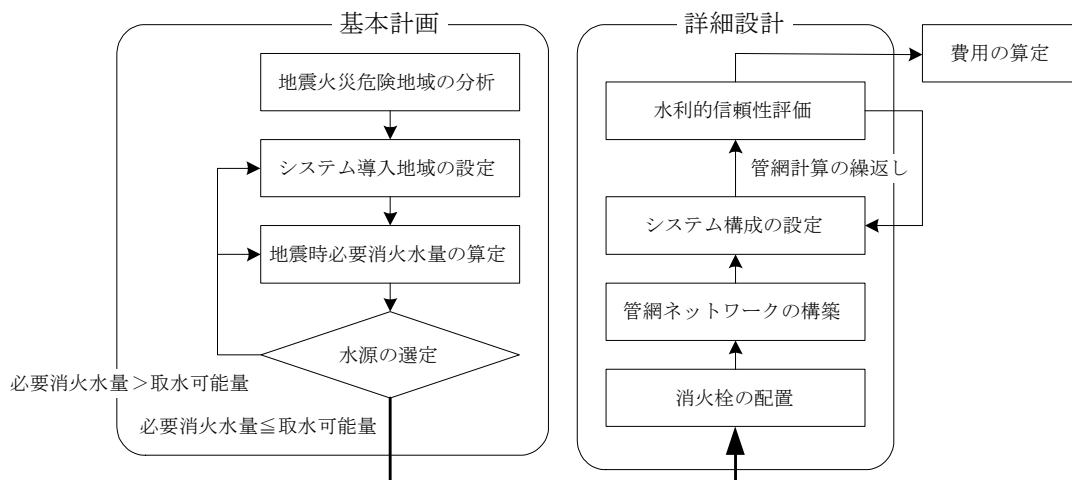


図1 システム導入の流れ

2.2 地震火災危険地域の分析

火災被害規模は燃焼力と消防力によって決まる。燃焼力は、市街地構造による地域の燃えやすさや風速、天候などの気象条件に左右される。消防力には消防隊および消防車両の数などの公設消防の体制や地域が保有する消防水利量、地域住民の防災意識などが関わっている。地震火災に対して危険度の高い地域を想定するには、これら地域が持つ燃焼力と消防力の他に、地域のもつ防災的視点からの重要度も考慮して分析する必要がある。以下に、詳細な分析手法を述べる。

(1) 市街地構造による火災危険度分析

火災の延焼危険性を示す指標として、木造建ぺい率（木造建築物の占める割合）や不燃領域率（空き地や耐火建築物の占める割合）などを用いて地域の火災危険度を算出しているものや、東京消防庁の延焼速度式¹¹⁾を用いた火災シミュレーションにより火災の延焼危険性を評価しているケースがある。これらの手法を用いて、火災危険度分析を行うことができる。

(2) 水道耐震化状況による分析

地震時における消火栓の使用可能性は、地中配水管の被害の有無により決まる。したがって、配水管の耐震化が遅れている地域では、地震時に消火栓が使用できない可能性が極めて高い。上水道システムは、通常、配水区と呼ばれる地区に分割されていることから、その区域ごとに水道の耐震化状況を評価すればよい。簡便な方法として、管路の管種・継手の特性から管路をある耐震ランクに分類して、その耐震ランクの管路の埋設比率を算定する方法が挙げられる。

(3) 防災的 중요度の高い地域

防災的 중요度の高い地域には、以下の防災施設が立地している地域とする。まず、市・区役所、県庁をはじめとし、財務事務所や食糧事務所といった指定地方行政機関、また JR、NTT などのライフラインに関する指定公共機関、警察、消防、病院施設などが挙げられる。また、指定避難所（一時避難所、広域避難所、収容避難所、要援護者用避難所）もこの防災拠点に含まれる。

2.3 地震時必要消火水量の算定と水源の選定

必要な消火水量の算定には、地震時における出火件数とその火災の延焼程度から予測できる。1995 年の兵庫県南部地震における火災被害は、近年の地震火災の中でも大きいものであり、都市域にシステムを導入する場合には参考となることが多い。そこで、本稿では兵庫県南部地震と同レベルの火災被害を仮定して、導入地域内で地震時に必要な消火水量を算出するモデルを提案する。

(1) 地震時火災発生状況の予測

地震時における出火件数の予測は関東大震災以降検討されており、「河角の式」¹²⁾の他、水野の方法¹³⁾、旧建設省総合開発プロジェクト（以下、総プロと呼ぶ）の方法¹⁴⁾がある。水野は伊豆半島沖地震以前の比較的大きな火災を伴った 13 の地震から地震発生時刻や季節を考慮した回帰式を提案している。一方、総プロの方法では、同様のデータを用いて多めに出火件数を推定する安全側推定式が提案されている。水野式、総プロ式をそれぞれ平均的に論じた場合の 2 推定式を以下に示す。出火件数の予測方法は、いずれも建物全壊率から出火率を算出するものである。

$$\ln y = 0.429 \ln x - 6.231 \quad (\text{水野推定式}) \quad (1)$$

$$\ln y = 0.299 \ln x - 4.656 \quad (\text{安全側推定式}) \quad (2)$$

ここに、 y ：出火率（1 世帯あたりの出火件数）（%）、 x ：建物全壊率（%）

次に、火災の延焼規模を設定する。火災形態から出火した建物 1 棟のみの焼失で鎮火する単体火災と隣接建物へ燃え移り延焼拡大していく類焼火災の 2 つのケースに分類すれば、必要消火水量の算出は簡便となる。参考として、兵庫県南部地震における神戸市で発生した火災の単体火災と類焼火災の割合および類焼火災の焼損面積を図 2 に示す。単体火災は 45%、類焼火災は 55%であった。また、一火災の延焼規模を設定するため、17 日中に鎮火した類焼火災における焼損面積¹⁵⁾の平均値を算定した結果、平均

値は 6,800m² であり、この値を類焼火災の延焼規模とした。一方、単体火災については、全国の持家の平均的な広さである 120m² (住宅・土地統計調査¹⁶⁾より) を単体火災の延焼規模とした。以上のことから、発生した火災の 45%が 120 m²、55%が 6,800 m² の焼損となると仮定し、必要消火水量を算定する。

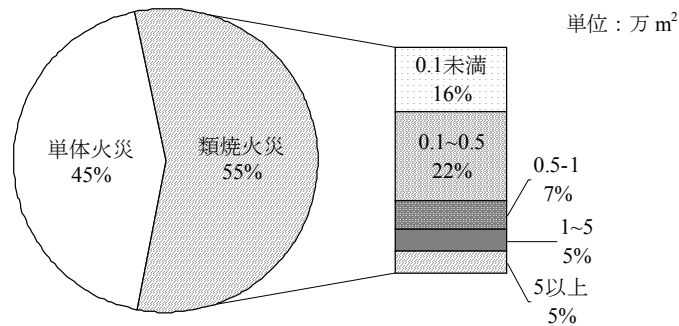


図2 兵庫県南部地震で発生した火災の延焼規模の割合

(2) 必要消火水量の算出方法

消火水量の算定については、堀内らの研究¹⁷⁾を参考とする。堀内らは神戸市の昭和 59 年以前の火災資料について解析を行い、建物火災の消火に関する以下の諸関係式を示している。諸関係式は焼損面積 600m² 以下の火災資料から得たものであるが、兵庫県南部地震の大規模火災データに適用して精度よく予測できることが確認されている¹⁷⁾。

$$S = 3.88A^{0.545} \quad (3)$$

$$\beta = 3.89A^{0.152} \quad (4)$$

$$N = P_w = S/2\beta \quad (5)$$

$$A_w = k \cdot A \quad (6)$$

$$T_1 = 0.938A_w^{0.700} \quad (7)$$

$$T_2 = 2.14T_1 \quad (8)$$

ここに、 A : 焼損面積(m²)、 S : 火面周長(m)、 β : 注水筒先 1 本あたりの平均正面幅(m)、 N : 所要水利点数(個)、 P_w : 放水消防ポンプ自動車台数(台)、 A_w : 放水時焼損面積(m²)、 k : 延焼増加割合(神戸市の統計資料より風速 6~2m/s の場合 $k = 0.75 \sim 0.91$)、 T_1 : 放水開始から鎮圧までの時間(min)、 T_2 : 鎮圧から鎮火までの時間(min)

式(5)では、水利点 1 箇所につき消防ポンプ自動車 1 台が配置でき、1 台の消防ポンプ自動車から 2 箇所へ放水できるものと仮定している。また、兵庫県南部地震では風速は例年になく小さく 4m/s 以下であったと言われているが、分析では安全側評価のため $k = 0.91$ とした。所要水利点数 N と放水時間 T ($=T_1 + T_2$)、標準の筒先 1 本あたりの放水量 0.5m³/min (消防ポンプ自動車の標準放水量 1 m³/min) から、単体火災と類焼火災の火災 1 件あたりの必要消火水量が表 1 に示すように算定できる。単体火災では 157 m³ の消火水量が必要であるのに対し、類焼火災ではおよそ 10,000 m³ もの消火水量が必要となる。これらの値にシステム導入地域内の出火件数を乗じることにより、地震時必要消火水量を算定することができる。また、以上のことから必要消火水量を求める式(9)を導くことができる。すなわち、出火した火災 1 件あたりに 6,000 m³ の水が必要である。

$$Q = (0.55 \times 10624 + 0.45 \times 157) \times Y \cong 6000Y \quad (9)$$

ここに、 Q : 必要消火水量(m³)、 Y : 全出火件数

表 1 必要消火水量の算定結果

| | 単体火災 | 類焼火災 |
|-------------------------|------|--------|
| 焼損面積(m ²) | 120 | 6,800 |
| 火面周長(m) | 53 | 476 |
| 平均正面幅(m) | 8 | 15 |
| 所要水利点数 | 3.2 | 15.6 |
| 放水時間(min) | 79 | 1,328 |
| 必要消火水量(m ³) | 157 | 10,624 |

(3) 水源の選定

消防専用水道システムは、消火用水のみを供給するシステムである。そのため、水源としては上水、雑用水、下水といった人工水利や河川、湖沼、海といった自然水利などあらゆる水源を用いることができる。例えば、日本の都市の多くは海に近い平野部に位置していることから、海を水源とし、管網内に海水をポンプで送水するシステムが考えられる。一方、台地など標高が高い場所では、ポンプ施設の建設費用などの面を配慮すると海水利用よりも付近の自然水利を水源とするのがよい場合もある。自然水利の代替案には、上水や雑用水、下水の水や、新設貯水槽などが挙げられる。システムの水源には、あらゆる水源を候補に挙げ、地震時必要消火水量を確保できるものを選定する必要がある。

2.4 消火栓と管路網の配置計画

(1) 消防水利の基準と消火栓の配置

消防水利の設置については、消防法第 20 条第 1 項に「消防に必要な水利の基準」¹⁸⁾が規定されており、消防庁の勧告として制定されている。本基準の第 4 条では以下のように記されている。「消防水利は、市街地又は密集地の防火対象物から消防水利に至る距離が表 2 に掲げる数値以下となるように設けなければならない。市街地又は密集地以外の地域で、これに準ずる地域の消防水利は、当該地域内の防火対象物から消防水利に至る距離が、140m 以下となるように設けなければならない。(表 2 参照)」また、堀内ら¹⁷⁾は、消防水利の基準では火元建物の全焼および隣家の再使用可能な類焼を許容して設定されていることから、火元建物を全焼させないことを目標として表 3 に示す新たな基準を提案している。消防水利の基準と比較して、堀内らの提案している距離は約 78~85m となり、水利点の間隔では 110~120m となる。本導入方法では消火栓の配置は表 2 に示した配置基準を満足するように決めることとする。建設費用等に余裕があれば、建物密集地域などに対しては表 3 に示す堀内らの基準を適宜採用して、消火栓の配置計画を行うことが望ましい。

表 2 消防庁が規定する消防水利の配置基準¹⁸⁾

| 用途地域 | 平均風速 | |
|---------------------------|----------------|----------------|
| | 4m/sec未満 | 4m/sec以上 |
| 近隣商業地域・商業地域・工業地域・工業専用地域 | 100m (140m) | 80m (113m) |
| その他の用途地域及び用途地域の定められていない地域 | 120m (168m) | 100m (140m) |

()内の数値は、水利点間隔

表 3 堀内らが提案する消防水利の配置基準¹⁷⁾

| 用途地域 | 平均風速 | |
|---------------------------|----------|----------|
| | 4m/sec未満 | 4m/sec以上 |
| 近隣商業地域・商業地域・工業地域・工業専用地域 | 82m | 78m |
| その他の用途地域及び用途地域の定められていない地域 | 85m | 82m |

(2) 管路ネットワークの構築

配管計画に際しては、埋設できる管路に制約が生じないよう幅広の道路上に管路を配置し、配管方式は水利的信頼性を高めるために、行き止まりの部分がなく、すべての管路が連結されたネットワークを形成する網目状配管を採用する。

2.5 管網解析による管径の決定

上水道の設計では、消火用水量を計画一日最大給水量に加算して配水管網の管網計算を行うことによって、配水管の口径が決定される。一方、消防専用水道システムの管路口径を決定するには、地震時の同時多発火災が発生し、多点で消火栓を使用した時に水圧が許容値を下回らないことと、さらにできるだけ費用が最小となるような管径を計画することが必要である。本節では、消火栓多点使用時を考慮した管網解析を行い、水利的信頼性が高く、経済的な管路口径の計画手法を示す。

(1) 水圧の許容値の設定

消火栓の圧力は、常に0以上とならなければならない¹⁹⁾。これは、消防ポンプ自動車や小型動力ポンプによる放水活動に支障をきたさないためである。また、管内水圧の最大値は、管路の属具の保証水圧によって決まる。これは、フランジや各種弁類などの属具の使用最高圧力が管の保証水圧に比べて低く、管路の使用最高圧力は一般にこれの制約を受けるためである。ダクタイル鋳鉄製のフランジの設計圧力は、種類により差があり、1.27~2.75MPaである。また、日本ダクタイル鉄管協会²⁰⁾は、高水圧で使用したダクタイル管路の例を示しており、その事例によれば、最大使用静水圧が最大のもので3MPaを超えている。したがって、管内水圧の最大値はおよそ3MPaとし、管内水圧の許容値は、0~3MPaと設定する。

(2) 流出量の設定

想定する類焼火災の必要消防水利点数は表1で示したように15.6基であるが、同時に15基もの消火栓を使用することは考えにくい。そこで、焼損6,800m²としたときの最遠の消火栓4基を除く周辺部の消火栓数12基を同時に使用する場合(図3)を仮定して、流出量を算定する。流出量は消火栓1基につき1m³/minと設定する。

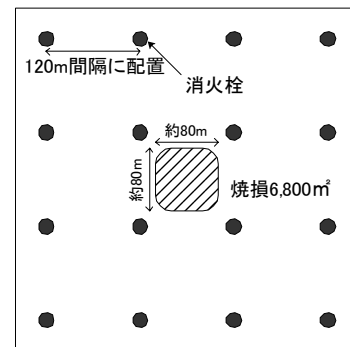


図3 想定した火災と使用消火栓

(3) 解析方法

システム導入には、管網解析を行い最適な管路設計をする必要がある。管路口径およびポンプ揚程を変化させて予備解析を行い、経験的にシステムの特性を把握した上で管内水圧が許容値を超えない管路構成を求める。これらの構成ケースの中から費用最小となるケースを選択することで、水利的信頼性と経済性を満足するシステム構成を設計することができる。

(4) 導入費用の算定方法

事業費用を算定する場合には、初期費用に加えて、将来支払うべき維持管理費用を算定することが一般的である。しかし、システム構成の違いによる維持管理費用の差は極めて低いことから、事業費用を初期導入費用のみとして算定する。表4に示す管路口径別の工事単価²¹⁾を用い、導入費用を算定する。

表4 管路口径別単価²¹⁾

| 管路口径 | φ100 | φ200 | φ300 | φ400 | φ500 | φ600 | φ700 | φ800 | φ900 | φ1000 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 単価(千円/m) | 90 | 100 | 130 | 170 | 200 | 240 | 280 | 320 | 370 | 430 |

3. 神戸市への適用事例

前章の基本的手法は、どの市地域においても適用されうるが詳細検討では個々のケースに応じた課題が発生する。本章では、前章で構築した消防専用水道システムの導入手法の具体的な適用事例を神戸市に適用して事例を示す。

3.1 導入地域の設定

(1) 火災危険度と防災的重要度を考慮した分析

火災の延焼危険性を示す指標としては、既に示したように建築木造率や建ぺい率などが用いられる。

しかし、詳細かつ最新のこれらのデータを入手することは困難であることから、本研究では代替指標として、1995年の震災時における建築木造率とその後の復興都市計画の有無、人口密度を用いる。

まず、建築木造率と火災の延焼危険性との関係について、著者らの既往研究¹⁾により建築木造率が0.5を超える領域で大規模な火災が発生することが知られている。そこで本研究では、建築木造率が0.5以上の地域は火災延焼の危険性があるものと想定した。

また、神戸市では、震災被害が甚大であった内で、生活の基盤整備が遅れており防災面等から早期に整備改善を図る必要のある地区、また、三宮や六甲道・新長田といった都心・副都心をはじめ土地の高度利用、都市機能の更新が必要な地域に対して復興都市計画を検討し震災直後の建築行為が制限された²⁾。復興都市計画の基本的方針には、都市の防災化が含まれており、具体的には防災広場の形成、道路・公園の整備、建築物の共同化、不燃化、耐震化、共同溝の整備などがある。また、震災前から事業が進められていた密集住宅市街地整備促進事業（市内9地域）について、震災の教訓を踏まえて事業の進め方が見直された。本事業手法は密集市街地の整備を目的としており、防災性の強化が見込まれる事業である。このように復興都市計画地域や市街地整備促進事業地域は防災性の高い地域となっていることから、本研究では地震火災に対して安全であるとみなした。

さらに、人口密度の高い地域で火災が発生した場合、人的被害が大となることが予想できる。人口密度は住宅密集状況と相関があると考えられ、住宅の建ぺい率の代替指標として用いることができる。本研究では、平成12年の国勢調査の記録²³⁾から町丁目別に人口密度を算出した。

以上のデータを基に、燃焼力が大となり危険となる地域を分析した。木造率が0.5を超える地域の中で復興都市計画が行われていない地域を危険とし、また、その地域を人口密度の値により分類して図4に示す。図4には既存あるいは検討中の防災拠点も併せて図示している。さらに、木造率が0.5未満または復興都市計画が実施された地域は除外され、色付けされていない。色付けされた地域は地震時に大規模な火災が発生するポテンシャルを持っているといえ、それらの地域の中でも、人口密度が高く地震火災に対して危険である地域は、灘区の山側の地域および兵庫区から須磨区にかけての山側の地域であることがわかる。また、防災拠点は中央区に集中して立地しており、火災危険地域には少ない。

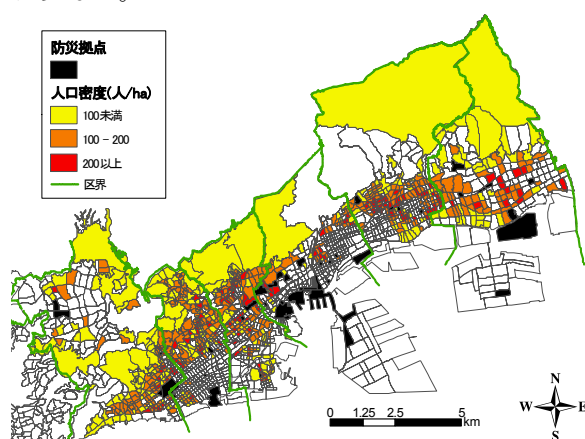


図4 防災拠点を考慮した地震火災危険地域の分布

表5 神戸市の水道耐震化状況²⁴⁾

| | 耐震ランク | 管種 | 継手 | 割合 |
|-------|-------|--------------------|-------|-----|
| 耐震管路 | ランクA | DCIP(S, S II, NS形) | 耐震継手 | 24% |
| | ランクB | DICP(A, K形) | 非耐震継手 | 68% |
| 非耐震管路 | ランクC | CIP, VPなど | | 8% |

平成14年度

(2) 既存上水道管路の耐震化状況分析

神戸市水道局における平成14年度時点の水道耐震管路の割合²⁴⁾を表5に示す。管路を管種・継手特性によってA～Cの3つに分類したところ、24%がランクAの管路であり、次いで68%がランクBの管路となっている。残りの8%がまだランクCの管路である。

本研究では、平成14年度時点の配水管網データ²⁵⁾を用い、配水区ごとの耐震ランク別の管路延長から耐震化率を算定した。ここで、ランクA耐震化率(管路総延長に対する耐震ランクA管路延長の割合)を配水区別に算定した結果を図5に示す。全体的にランクA耐震化率は低い値であるが、東灘区から中

中央区の海側および2つの人工島では高い値を示している。埋立地などの軟弱な地盤がある地域では水道管路の耐震化が進んでいる。次に、ランク B 耐震化率（管路総延長距離に対する耐震ランク A および B の管路延長の割合）を同様に求め、図 6 に示す。ランク B 耐震化率は全体的に高い値であるが、中央区西部から長田区東部の山側地域と兵庫区西部の海側地域、灘区と東灘区の境界の山側地域で低い値を示している。これらの地域では、2~4 割の管路がランク C の非耐震管路である。神戸市水道は自然流下式で配水されており、各配水区への配水幹線は耐震化が進んでいるため、下流側配水区の断水に対する信頼性は上流側の配水区のものと変わらないものと考えられる。

(3) システム導入地域の選定

(1)の結果より、地震火災に対する危険性の高い地域は、灘区の山側の地域および兵庫区から須磨区にかけての山側の地域である。また、(2)の結果より、地震時に配水管路に被害が生じ水道消火栓が稼働不可となる地域は、中央区西部から長田区東部の山側地域と兵庫区西部の海側地域、灘区と東灘区の境界の山側地域である。これらの結果から、中央区西部から長田区にわたる山側地域がもっとも危険であり、次に東灘区西部から灘区にわたる山側地域も危険であるといえる。

そこで、本研究では、地震時にもっとも危険性の高い中央区から長田区にかけての山側地域（図 5、6 の太線で囲まれた地域）を消防専用水道システムの導入地域と想定する。本地域は面積 10km²、人口 126,400 人、世帯数 57,200 世帯の地域である。

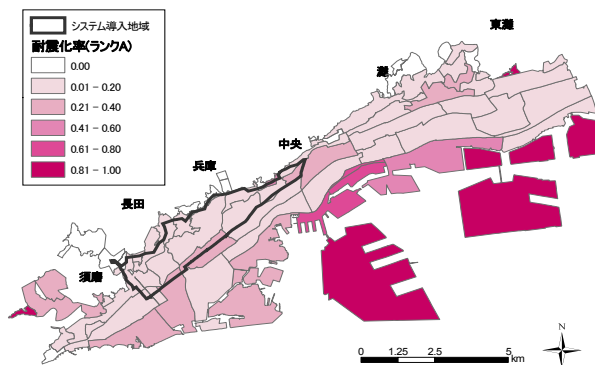


図 5 配水区別水道配水管耐震化率（ランク A）

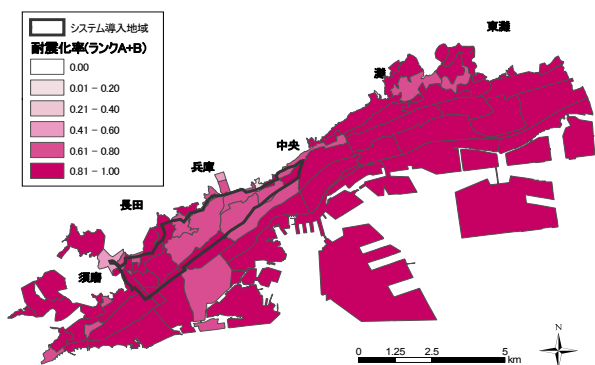


図 6 配水区別水道配水管耐震化率（ランク A+B）

3.2 地震時必要消火水量の算定と水源の選定

(1) 出火件数の予測

兵庫県南部地震レベルの地震規模を想定し、同様の建物被害が発生したとして出火件数予測式により出火件数を予測する。兵庫県南部地震時に被害が大きかった神戸市 6 区の倒壊率の平均値は 24% である。式(1)、(2) に示した総プロの方法から、出火率 Y は、水野推定式では 0.008%、安全側推定式では 0.025% となる。この対象地域の世帯数は 57,242 世帯であるので、出火件数は水野推定式では 4.4 件、安全側推定式では 14.1 件となる。以上より、兵庫県南部地震レベルの地震を想定した場合、対象地域内での地震直後の出火件数は 4~14 件となる。本稿は必要消火水量を算出するという目的であるため、もっとも大きな値である 14 件の火災発生を設定する。ここで、兵庫県南部地震時の火災発生状況を参考にすると、該当地域では地震発生直後に 12 件の火災が発生し、当日の 10 時までに 17 件の火災が発生している¹⁵⁾。火災 14 件という本推定はほぼ妥当なものといえる。

(2) 必要消火水量の算出

出火した 14 件の火災のうち 6 件（45%）が単体火災、8 件（55%）が類焼火災となったと設定する。2.3 で示したように、単体火災の焼損面積は 120m²、類焼火災の焼損面積は 6,800m² とする。設定した火災件数および延焼規模ごとの必要消火水量の算定結果を表 6 に示す。単体火災と類焼火災とを合わせると、本消防専用水道システムの必要消火水量はおよそ 86,000m³ となり、これは学校の 25m プール（約

400m³) 200 杯分に相当する。

(3) 水源の選定

システム導入の対象地域周辺において、必要消火水量を満足できる水源として、2 箇所の候補が存在する。一つは烏原貯水池、他は送水トンネル、すなわち阪神水道企業団から供給される水である。烏原貯水池は、現在は貯水池ではなく洪水調整池として使用されている。満水時の水面積が 11.5 万 m² であり、貯水量は 13.1 万 m³ である。また、送水トンネルを水源とした場合、阪神水道企業団からの供給能力は 67.2 万 m³/日である。阪神水道企業団のシステムが地震後も有効に稼動しておれば、算定した必要消火水量がおよそ 86,000m³ であることから、いずれの水源も、十分な消火用水を供給することができる。

表 6 必要消火水量の算定結果

| | 単体火災 | 類焼火災 |
|---------------------------|--------|--------|
| 必要消火水量 (m ³) | 157 | 10,624 |
| 火災件数(件) | 6 | 8 |
| 必要消火水量合計(m ³) | 944 | 84,996 |
| | 85,940 | |

3.3 システムの詳細設計

(1) 消火栓の配置と配管網の構築

消火栓の配置間隔については、消防庁の基準 168m を基準として、建物密集地域では堀内らの基準 110m¹⁷⁾を用いること、設置場所については、消防活動の便利さと施設建設の観点から、敷設可能な幅広の既設道路上に優先して埋設することを基本的な考え方とした。具体的には、幅広の道路上から消火栓から配置間隔を直径とする円内に対象地域が全て覆われるように消火栓を配置した。次に、管路が網目状管網になるように道路をつながながら管路網を構築した。対象地域内に消火栓数は 450 基をもつ管路網が図 7 に示すように構築できた。

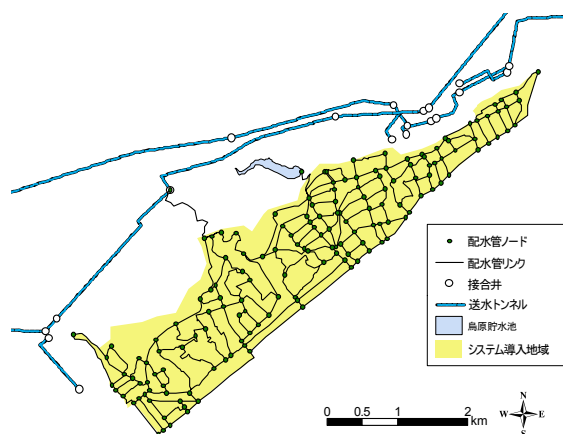
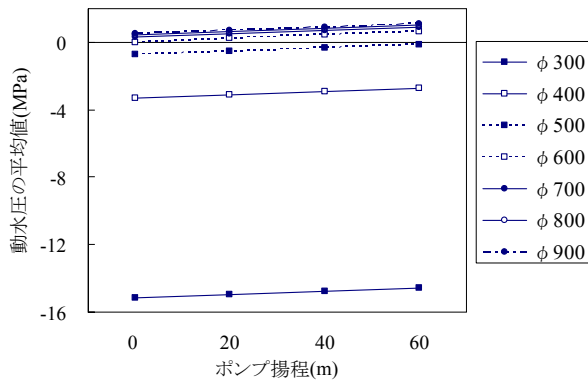


図 7 消防専用水道システムの管路網図

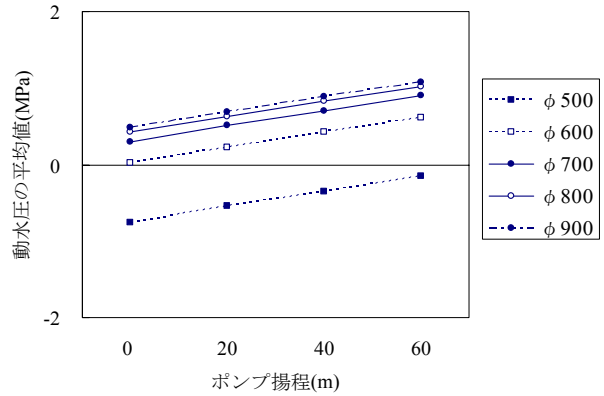
(2) 管網解析による管径の決定

管網内の水圧状況を把握するために、地震時における消火栓の使用を管網からの流出として表現し、管網解析を行う。まず、予備解析として全管路を同一の管径として解析を行う。次に予備解析結果を参照して予め水圧が低くなりやすい管路を検討し、通常用いられる配水幹線の最小口径を採用するなどの経験的知見をもとに管径φ300以上の管路を組合せたケースで解析を行い、管内水圧が許容値 0~3MPa を満足する構成を求める。

予備解析結果として、管径別のポンプ揚程と管内動水圧の平均値との関係を図 8 に示す。ポンプ揚程を変化させるよりも管径を変化させた方が、管内水圧は大きく変わる。また、管径が増大すれば、管内水圧の変化は徐々に小さくなる。ここで、例として、口径φ600・ポンプ揚程 0m の場合の管路網における管路節点の水圧分布を図 9 に、管路網の節点における動水圧と標高の関係を図 10 に示す。動水圧の高さは北西側で低く、標高という地理的要因が大きく関わっている。これは対象地域の標高差が非常に大きいことに起因している。また、管路内の最大静水圧はポンプ揚程に依存し、その揚程高さの分だけ変化する。ポンプ揚程 60m の場合でも、ポンプ地点の標高が 81m であることから最大静水圧は 1.4MPa となり、動水圧を加えても許容値の 3MPa 以下を満足している。つまり、管径の構成を設定する場合には、まず、標高の高い地点に位置する管路の口径を大きくすることが重要である。次に、管径を増大させ動水圧の変化が小さくなったところで、ポンプにより調整することが適切であるといえる。



(a) 全体図



(b) 拡大図（動水圧 0 付近）

図 8 管径別にみた管路内動水圧の平均値

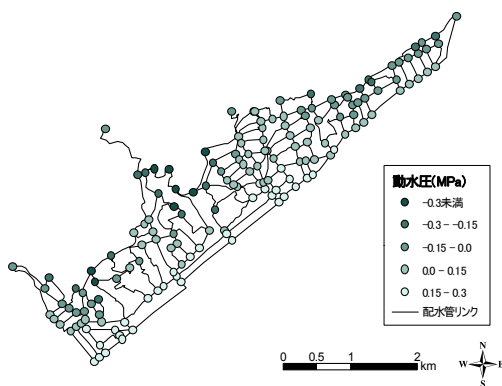


図 9 管路節点の水圧分布
(管径φ600・ポンプ揚程0mのケース)

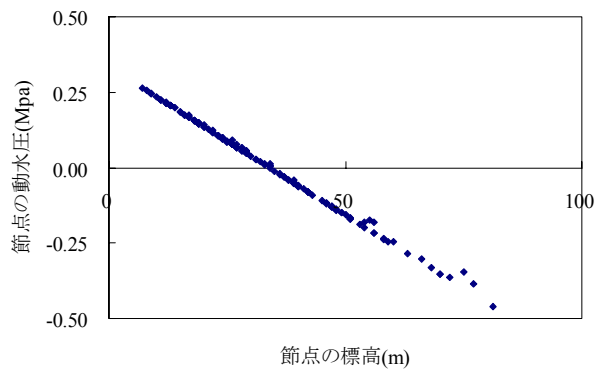


図 10 管路節点における動水圧と標高の管径
(管径φ600・ポンプ揚程0mのケース)

予備解析の結果から、管路を、①水源と管路網をつなぐ送水管の性質を持つ管路、②標高の高い節点へ流入する管路、③その他の管路の3種類に分類した。①の管路は大口径の管路である必要がある。②の管路については、標高の高い地点で水圧が極端に低くなるため、比較的平坦な地域よりも大口径の管路とした方が経済的である。管路①、②、③の延長距離はそれぞれ1.5km、8.5km、62.6kmとなった。

解析を行ったケースの条件を表7に示す。管路①、②、③の関係については、管径の大きさに制約を設け、口径の大きさが逆転しないことと、口径の差が大きくなり過ぎることを避けた。地震時の同時多発的の火災を考慮した合計184ケースの解析を行った結果、管路内の動水圧が負圧とならず、許容値を超えなかったものは、184ケース中86ケースであった。これらのシステム構成は地震時の同時多発的の火災に対しても機能を失うことはなく、水利的信頼性の高いシステム構成であるといえる。

表 7 解析ケース

| 項目 | 解析ケースなど |
|------------|--|
| ポンプ揚程(m) | 0, 20, 40, 60 |
| 管路①の口径(mm) | 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 |
| 管路②の口径(mm) | 300, 400, 500, 600, 700, 800 |
| 管路③の口径(mm) | 300, 400, 500, 600, 700 |
| ①, ②, ③の関係 | ① \geq ② $>$ ③, ②-① \leq 300, ③-② \leq 300 |
| ケース数 | 184ケース |

(3) 経済性を考慮したシステム構成の決定

経済的に優れたシステム構成を求めため、前節で選定した 86 ケースのシステム構成についてそれぞれ導入費用を算出し、経済性を考慮した分析を行う。86 ケースのシステム構成において、その費用と水利的信頼性の高さについてまとめたものが図 11 である。管網解析における動水圧の最小値が大きいほど水利的信頼性は高く、揚程が高くなるにつれてより信頼性の高いシステムとなることがわかる。揚程が 0m の場合、86 ケースの内 1 ケースだけが該当した。本図より導入費用の最小値は 108.6 億円となった。動水圧が負圧とならない 86 ケースのうち、総費用の少ない 8 ケースを表 8 に示す。いずれも、ポンプ揚程が 40m 以上で、かつ貯水池、送水トンネルからの管路はφ700mm 以上、基本的な管路口径はφ300mm である。その他のケースについても、数億円の差でより水利的信頼性の高いものが存在している。数億円の差が生じるのは、導入地域が広大であるためである。例えば、表 8 のケース 1～3 では、水源と管路網を結ぶ 1.5km の管路の口径が異なることだけで総費用に 2 億の差が生じている。さらに、導入地域の管路延長や標高差などの物理的要因によって支配されているところが大きい、許容水圧の範囲設定から本検討地域では 100 億から 250 億の範囲でシステムを導入できることがわかる。

システム構成を決定する際に、本適用例では最小水圧 0MPa を確保すると仮定して、費用が最小となるケース 1 を採択している。しかし、消防実務の観点から高い水圧を確保する必要がある、それに応じて費用を決定すればよいと考えられる。

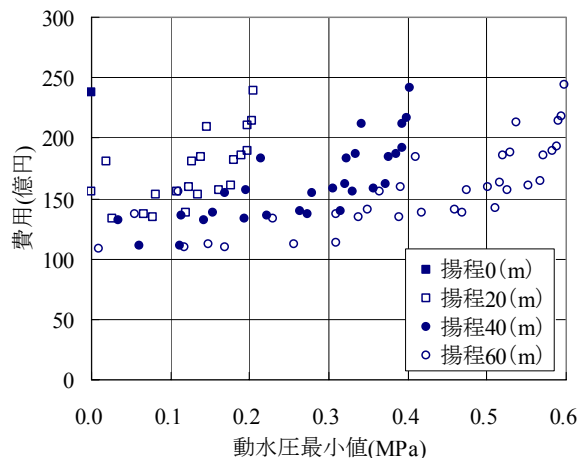


図 11 システム導入費用と水利的信頼性

最小導入費用のシステム（表 8 のケース 1）の管網構成図を図 12 に示す。また、その構成と導入費用の詳細を表 9 に示す。本システム構成は、水源と管路網を結ぶ管路（延長距離 1.5km、管路①）の口径がφ700、標高の高い地域に配水する管路（延長距離 8.5km、管路②）の口径がφ500、その他の管路（延長距離 62.6km、管路③）の口径がφ300 であり、ポンプ設備は揚程 60m である。

表 8 動水圧が負圧とならず費用 113 億円以下の管網ケース

| ケース | 動水圧 最小値 (MPa) | 動水圧 平均値 (MPa) | ポンプ 揚程 (m) | ① 管路 | ② 管路 | ③ 管路 | 総費用 (億円) |
|-----|---------------------|---------------------|------------------|---------|---------|---------|-------------|
| 1 | 0.009 | 0.513 | 60 | 700 | 500 | 300 | 108.6 |
| 2 | 0.118 | 0.622 | 60 | 800 | 500 | 300 | 109.2 |
| 3 | 0.169 | 0.674 | 60 | 900 | 500 | 300 | 110.0 |
| 4 | 0.061 | 0.567 | 40 | 800 | 600 | 300 | 110.6 |
| 5 | 0.113 | 0.619 | 40 | 900 | 600 | 300 | 111.4 |
| 6 | 0.148 | 0.654 | 60 | 700 | 600 | 300 | 112.1 |
| 7 | 0.257 | 0.763 | 60 | 800 | 600 | 300 | 112.6 |
| 8 | 0.309 | 0.815 | 60 | 900 | 600 | 300 | 113.4 |

表 9 最も経済性の良いシステム構成と導入費用の算定結果（表 8 中のケース 1）

| 項目 | | 単価(円/m) | 管路延長距離(m)およびポンプ揚程(m) | 費用(億円) |
|-----|------|------------|----------------------|--------|
| 管路 | φ300 | 130,000 | 62,634 | 81.4 |
| | φ500 | 200,000 | 8,534 | 17.1 |
| | φ700 | 280,000 | 1,482 | 4.2 |
| | 計 | — | 72,651 | 102.6 |
| ポンプ | | 10,000,000 | 60 | 6.0 |
| 計 | | — | — | 108.6 |

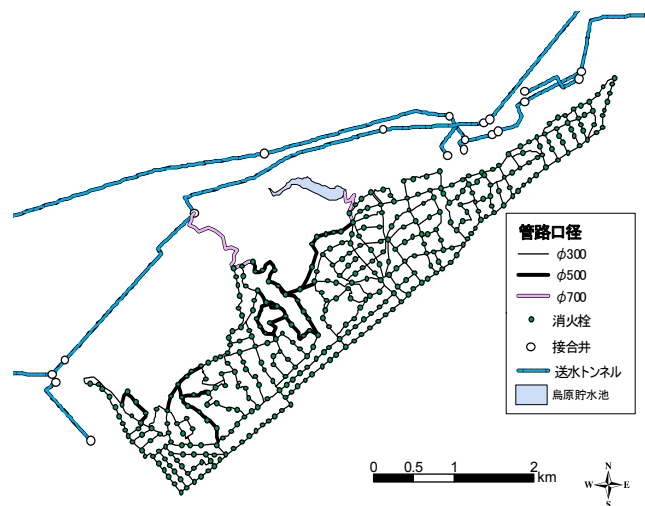


図 12 消防専用水道システムの口径別管網図（表 8 中のケース 1）

これまで日本には消防専用水道システムという概念やシステム導入の体系的な考え方がなかったが、様々な分析結果や消防水道としての機能確保の考え方を設定することによって、システム導入を可能にするまでの方策があることを示した。本消防専用水道システムを神戸市に導入する事例では、システム導入地域について配水管路の地震時信頼性、火災脆弱地域、防災機関の位置を考慮して決定したが、さらに地域の経済活動、人口動態、行政的配慮など多くの不確実な要因が絡んでくる。実際の設計においては、これらは配慮されるべきものであるが、本論文では設計の考え方の基本を示したものである。また、地域が適切に選定できれば、水源や管路の設計における不確実な要因は物理的な観点から解決される問題となる。さらに、実際に適用されることになれば、さらに消防関係機関における消火水量確保のための計画や対策の実施状況などシナリオを設定する上での不確実な要因を十分配慮した上で詳細計画を立てていく必要がある。システム導入の妥当性については、現状の配水管路を耐震化させる、防火水槽を設置するなどの代替案と比較することで検討できるが、その方法については拙著論文²⁶⁾を参考にされたい。

4. まとめ

本研究では、消防専用水道システムの基本計画から施設の設計、導入費用の算定までの手法を提案した。また、構築した消防専用水道システムの導入手法を基に、神戸市を導入地域の例に挙げ、システムの計画・設計を具体的におこなった。以下に構築した導入手法と適用例から得られた知見をまとめる。

- (1) システム導入地域を選定するために、市街地構造による火災危険度分析に加え、震災時に拠点となる防災拠点の立地状況を考慮した分析と、地震時の消防水利にかかわる既存上水道の耐震化状況の分析を行うことを提案した。
- (2) 地震時の必要消火水量は、既往研究および兵庫県南部地震の火災分析から火災 1 件あたり 6,000 m³の消火水量が必要であることを示し、算定方法に取り入れた。
- (3) 神戸市において、建築木造率および復興都市計画などの市街地状況や建築物や人口の密集状況、地震時に重要となる防災拠点の立地状況を考慮し、地震火災に対して被害が大となる危険性を町丁目ごとに分析した。また、水道の耐震化状況を分析するため、配水区別に水道耐震化率を算出した。以上の分析結果から、中央区西部から長田区にわたる山側地域が地震時火災に対してもっとも危険な地域であることが示された。

- (4) 兵庫県南部地震の建物被害と総プロの方法により導入地域内の出火件数を14件、必要消火水量はおよそ86,000 m³と推定した。兵庫県南部地震の火災件数と比較して妥当な推定であるといえる。
- (5) 消防水利基準に準じ、システム導入地域において消火栓を405基配置した。配置した消火栓をもとに管路網を形成して管網解析をおこなった結果、184ケース中86ケースにおいて、管路内の水圧が許容値を超えず、水利的信頼性を満たすシステム構成であることがわかった。
- (6) 水利的信頼性が得られた86のシステム構成について導入費用を算定した結果、もっとも導入費用が少ない経済的なシステム構成を求めることができた。そのシステムの導入費用は108.6億円となった。
- (7) 本研究で示したシステム導入方法は基本的な設計の考え方を示したもので、適用する際には社会活動や住環境、地理的要因、さらには消防関係機関における消火水量確保のための計画や対策の実施状況などの不確定な要因が含まれる。これら不確実な要因を十分配慮した上で詳細計画を立てていく必要がある。

謝 辞

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には、水道管路網に関する資料を提供して頂き、また貴重なご意見を賜りました。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、消防施設に関する資料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、畝田泰子：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、2005年、pp.1-15.
- 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、1992年、pp.193-202.
- 3) 澤田雅浩、高橋信之、塚越功、尾島俊雄：地震災害時を考慮した震が関地区における水供給方策に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第514号、1998年、pp.21-26.
- 4) 高山純一、飯坂貴宏：大震時同時多発型火災を想定した消防力低下地域の評価と消防水利計画に関する研究－金沢市を事例に－、土木計画学研究・講演集、No.20(2)、1997年、pp.475-478.
- 5) 大窪健之、本田剛久、小林正美：風土に根ざした地震火災用消防水利システム－京都市における疎水型開水路を活用した消防水利構築に関する研究報告－、土木学会論文集、No.681/IV-52、2001年、pp.101-112.
- 6) 例えば、国土交通省近畿地方整備局：近畿の川づくりにおける取り組み（平成15年度河川事業の概要）、2005年、p.河川-4 (http://www.kkr.mlit.go.jp/river/river_old/h15zogyo/pdf/15-14.pdf) .
- 7) 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、1990年、pp.715-720.
- 8) 亀田弘行他：1989年ロマプリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域等の被害に関する調査研究、文部省科学研究費（No.01102044）総合研究(A)突発災害研究成果重点領域「自然災害」総合研究班、No.B-1-3、1990年、pp.271-300.
- 9) 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.
- 10) 川北和徳、飯島宣雄、上野英世、船井洋文、松田奉康、本山智啓：上水道工学〈第3版〉、森北出版、1999年.
- 11) 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、1997年、pp.33-59.

- 12) 小出治：大震火災時の被害予測手法の研究、東京大学学位論文、1984年。
- 13) 水野弘之：地震時の出火件数の予測に関する研究、日本建築学会論文報告集、No.250、1976年、pp.81-90.
- 14) 建設省（総合技術開発プロジェクト）：都市防火対策手法の開発報告書、1982年。
- 15) 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年。
- 16) 総務省統計局ホームページ（住宅・土地統計調査）：<http://www.stat.go.jp/index.htm>
- 17) 堀内三郎、保野健治郎、室崎益輝：新版 建築防火、朝倉書店、1999年、pp.179-235.
- 18) 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。
- 19) 日本水道協会：水道施設基準解説、1959年、pp.245-246.
- 20) 日本ダクタイル鉄管協会：ダクタイル管路 設計と施工、日本ダクタイル鉄管協会技術資料 JDPAT 23、2002年。
- 21) 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。
- 22) 神戸市：阪神・淡路大震災 - 神戸市の記録 1995年、1996年、pp.632-639.
- 23) 神戸市企画調整局ホームページ：<http://www.city.kobe.jp/cityoffice/06/>
- 24) 神戸市水道局：耐震管路延長データ（内部資料）
- 25) 神戸市水道局：水道配水管網データ（内部資料）
- 26) 高田至郎、楯田泰子、勤息義弘：消防専用水道システムの導入効果算定法、日本地震工学会論文集 第7巻、第4号、2007年

（受理：2006年7月4日）
（掲載決定：2007年4月2日）

Proposal for the Method to Install Dedicated Water Supply System for Firefighting and Its Application

TAKADA Shiro¹⁾, KUWATA Yasuko²⁾ and GONSOKU Yoshihiro³⁾

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

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

3) Graduate student, Kobe University

ABSTRACT

In this paper a method to install dedicated water supply system for firefighting is proposed in order to maintain firefighting water in an emergency like earthquakes. At first, the method to determine the fire hazard area and to estimate water volume required for fire extinguishing is proposed. Analyses on fire damage during the Kobe earthquake are used in this method. Furthermore, the water supply system is designed using water flow analysis considering hydraulic reliability and cost. An application to Kobe City is shown as an example at last.

Key Words: fire following earthquakes, dedicated water supply system, install cost