

緊急給水に対する事前防災対策の影響分析手法*

Analytical Method of the Effect of the Pre-disaster Measures for Emergent Water Supply *

中島和樹*、奥村誠***、塚井誠人****

By Kazuki NAKASHIMA, Makoto OKUMURA, Makoto TSUKAI

1. はじめに

阪神大震災以降、西日本でも大規模な地震が断続的に起こり、大規模な地震に備えて必要な対策を事前に検討していくことが必要となっている。上水道が破壊し復旧するまでの間は、主に配水車による給水が行われる。この間、住民が被災地で生活しなければならないため、そのニーズに対応できるように事前の災害対策、防災対策を立てることが必要である。

しかし事前に災害の規模や、詳細な被災状況を予測することは不可能であり、そのときに使える資源や人材も明らかではないという問題がある。そこで、いくつかの被害状況の想定の下で事後の対応手順をシミュレートして、その実行可能性を保証しておく必要がある。また、道路、橋、配水池の耐震化など、その実施に時間のかかるような事前対策を限られた予算の中で選んで実施するためには、それぞれの施設の耐震化が被災後の給水作業にもたらす影響を定量的な検討に基づいて明らかにし、効果の大きいものを見極める必要がある。

本研究は、上水道の寸断時を想定して、自治体が耐震化配水池などに存在する浄水を配水車により複数の給水点に輸送して住民が持参した容器に給水し、その後居住地までは住民が徒歩や自転車などで運搬するという給水方法を考える。ヒュ-リスティック解法のひとつであるシミュレーテッド アニーリング (SA) 法により具体的な地域において効率的な給水方法の算定手順を確立する。さらにこの計算手法を軸とする感度分析により、配水池や橋梁の耐震化が緊急時の給水作業にもたらす影響を分析する方法を提案する。実際に東広島市西条地域のケーススタディーを通して、本手法の適用性を示す。

2. 関連する研究と本研究の目的

物資の輸送を効率的に行うための計画問題は、従来から巡回セールスマン問題の近似解法や整数計画法問題の

*キーワード: 防災計画、GIS、計画情報

** 正会員 修士(工) 日本道路公団宇都宮工事事務所

*** 正会員 博士(工) 広島大学大学院工学研究科

**** 正会員 修士(工) 広島大学大学院工学研究科

(〒739-8527東広島市鏡山1-4-1Tel&Fax 0824-24-7849)

取り扱いなどが OR の主要な研究対象として多数研究されてきた¹⁾。最近では物流費用の最小化だけではなく、都市環境の改善や在庫の不確実性の管理を含めたような多目的計画の枠組みで捉え、「物流計画」よりも総合的な「ロジステックス」問題として捕らえた研究もなされている²⁾。このような多目的問題は厳密解を得にくいこともあり、コンピュータの計算能力の進展も寄与して GA を筆頭とするソフト・コンピューティング技術の応用が目覚ましく進んでいる³⁾。

本研究が対象とする災害時の物資の調達、配送問題に対して、このような計算モデルを適用しようとする試みも行われている⁴⁾。しかしながら、被災の想定によって最適解がかなり違ったものになるために、実際の災害の状況がつかめない事前の段階で災害時の厳密な最適解を求めることの意味が乏しい。基本的想定下でのシミュレーションを用意し、災害発生後に収集される情報を用いて時々刻々、最適解を求めなおして対応策を検討するツールの開発がひとつの課題となっている。

一方、求められた最適解そのものは事後に意味を持たないにせよ、感度分析により多くのケースに共通する解の性質を把握しておくことは、頑健性のある事前対策を立案する上で不可欠である⁵⁾⁶⁾⁷⁾。たとえば具体的な給水点の場所が変化したとしても、その個数や必要となる配水車の台数が安定的に求められるならば、それに応じた人員や資源の確保を進めることが可能である。

本研究では、緊急時の給水問題を給水点配置問題と配水車による車両巡回問題の複合問題と考える。前者は全ての居住地を運搬可能範囲内に収め、かつ、給水点の個数が最小になる給水点の配置場所を求める問題である。住民の運搬可能距離の制約を与えれば給水点の個数と位置が求まる。後者は給水点配置問題によって決定した給水点を、何台かの配水車が巡回するときの総距離を最小にする問題である。この問題の解として、必要な配水車の台数や配水車が巡回するときの総距離が求まる。

本研究の目的は、施設の耐震化といった事前対策の立案に有用な知見を獲得する手法を提案することである。そのため、様々な被害想定に対して、上述した給水計画問題の近似解をパソコンレベルで簡便に提供する方法を確立し、それを軸とする感度分析の方法を提案する。

3. モデルの定式化

(1) 給水点配置問題の定式化

全ての居住地を運搬可能範囲内に収め、かつ、給水点の個数が最小になるような給水点配置パターンを求める。これは、離散的空間内の各点に施設を配置する施設配置問題の中の、集合被覆問題に当たり、以下のような整数計画問題として定式化できる。

目的関数

$$\min \sum_{j \in J} f_j y_j \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{j \in \{k | C_{ik} \leq C_{\max}\}} y_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

ただし、

i : 住民の居住地

j : 給水点候補地

I : 全ての居住地の集合

J : 全ての給水点候補地の集合

f_j : 給水点の立地コスト(全ての候補地に1を与える)

y_j : j 地点に給水点を設置する場合1
設置しない場合0

C_{ik} : i 地点の人々の最も近い給水点までの移動距離

C_{\max} : 運搬可能距離

y_j は、モデルの操作変数であり、 j 地点に給水点を設置する場合は1、設置しない場合は0となる。制約条件(2)式は、どの居住地の人々も運搬可能距離 (C_{\max}) 以内に含まれるように給水点を設置することを意味している。給水点の設置においては金銭的な費用は大きな問題ではないので、すべての候補点の立地コストを1と置いて目的関数(1)式を最小化することによって、給水点の個数が最小になる給水点配置を求める。この問題は整数計画問題であり最適解を求めるための計算手間は膨大である。ここでは Erlenkotter が提案した双対上昇法と、双対調整法⁸⁾を用いて近似解を得る。

(2) 配水車巡回問題の定式化

本研究の配水車巡回問題は巡回セールスマン問題に当たり、次のように定式化される。

目的関数 $\min \sum_{i,j \in I} X_{ij} Z_{ij} \quad (4)$

制約条件 $\sum_{i \in I} Z_{ij} = 1 \quad j \in I \quad (5)$

$$\sum_{j \in I} Z_{ij} = 1 \quad i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_L} W_i \leq b \quad (7)$$

ただし、

i, j : i 地点、 j 地点の給水点

X_{ij} : i 地点 - j 地点間の距離

Z_{ij} : i 地点 - j 地点間を巡回する場合1、
巡回しない場合0

I : 対象とする地域の給水点の集合

I_L : 1ループ間の給水点の集合

W_i : i 地点の給水点での水の需要量

b : 配水車の積載容量

Z_{ij} はモデルの操作変数であり i 地点 - j 地点間を巡回する場合1、しない場合0をとる。制約条件(5)、(6)式は、どの給水点にも必ず1回配水車が来ることに対応する。(7)式は、配水車が積載した水を配り、再び配水池に補給に戻るまでの1ループの間で、各給水点の総需要量が配水車の容量(b)を超えない条件式である。

この問題を標準的なSA法により解くために、まず(7)式の制約条件を一旦無視し、全ての給水点を1回ずつ巡回する順に並べた文字列により巡回路を表現する。当初配水車には容量 b の水が満載されていると仮定し、巡回した給水点での需要量を差し引いていく。残存量が負になる場合には、一つ前の給水点とその給水点の間に、最も近くで b の水量を補充できる配水池を選び、そのための移動距離を加算する。当該給水池の残存量から水量 b を差し引いて、次の巡回ループの計算を続ける。同時に所与の道路上の移動速度から所要時間を求め、ループの途中で1日の運用時間を超える場合には別の配水車を運用することとし、配水車の必要台数を加算する。以上の手順によって(7)式の条件を満たす巡回路が生成され、目的変数である総移動距離のほか総所要時間と必要台数が求まる。

SA法では、全給水点の巡回順序を示す文字列の中から任意の2点をランダムに選びその巡回順序の交換を考える。これにより制約条件(5)(6)は満たされる。交換により総移動距離が与えられたレベル以上に増加しなければ、その交換を受け入れる。交換の許容レベルを徐々に下げながらこの手順を多数回繰り返すことによって、配水車巡回問題の近似解を得ることができる。

配水車の必要台数は目的変数である総移動距離に依存するため、給水点を複数の配水車に分担させる問題を別途考えなくても、上述した計算方法で近似的に必要な台数が小さな解を得ることができる。

4. 施設被災の影響分析の例

(1) 設定条件と給水点配置問題

本研究では、広島県東広島市の西条地区(図-1)をとりあげ1:2500数値地図から道路網を抽出した。また、国土数値情報土地利用ファイルの100mメッシュのうち

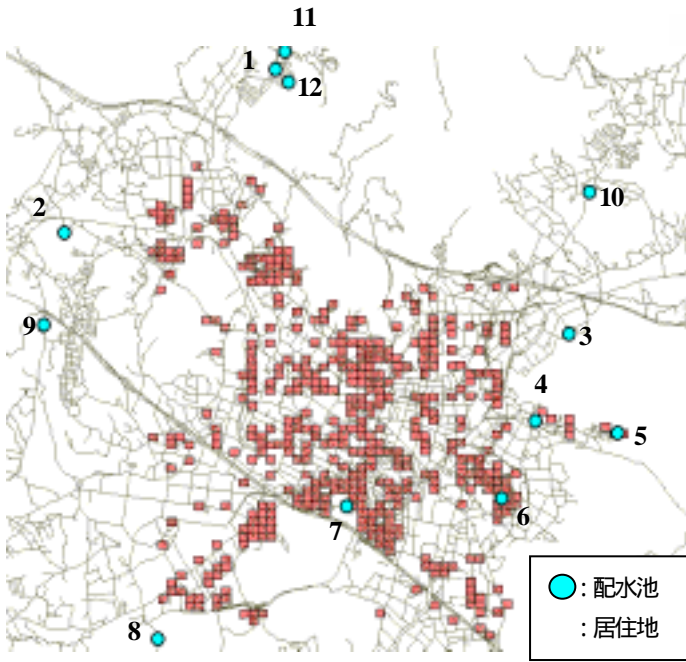


図 - 1 研究対象地区



図 - 2 給水点の設置パターン

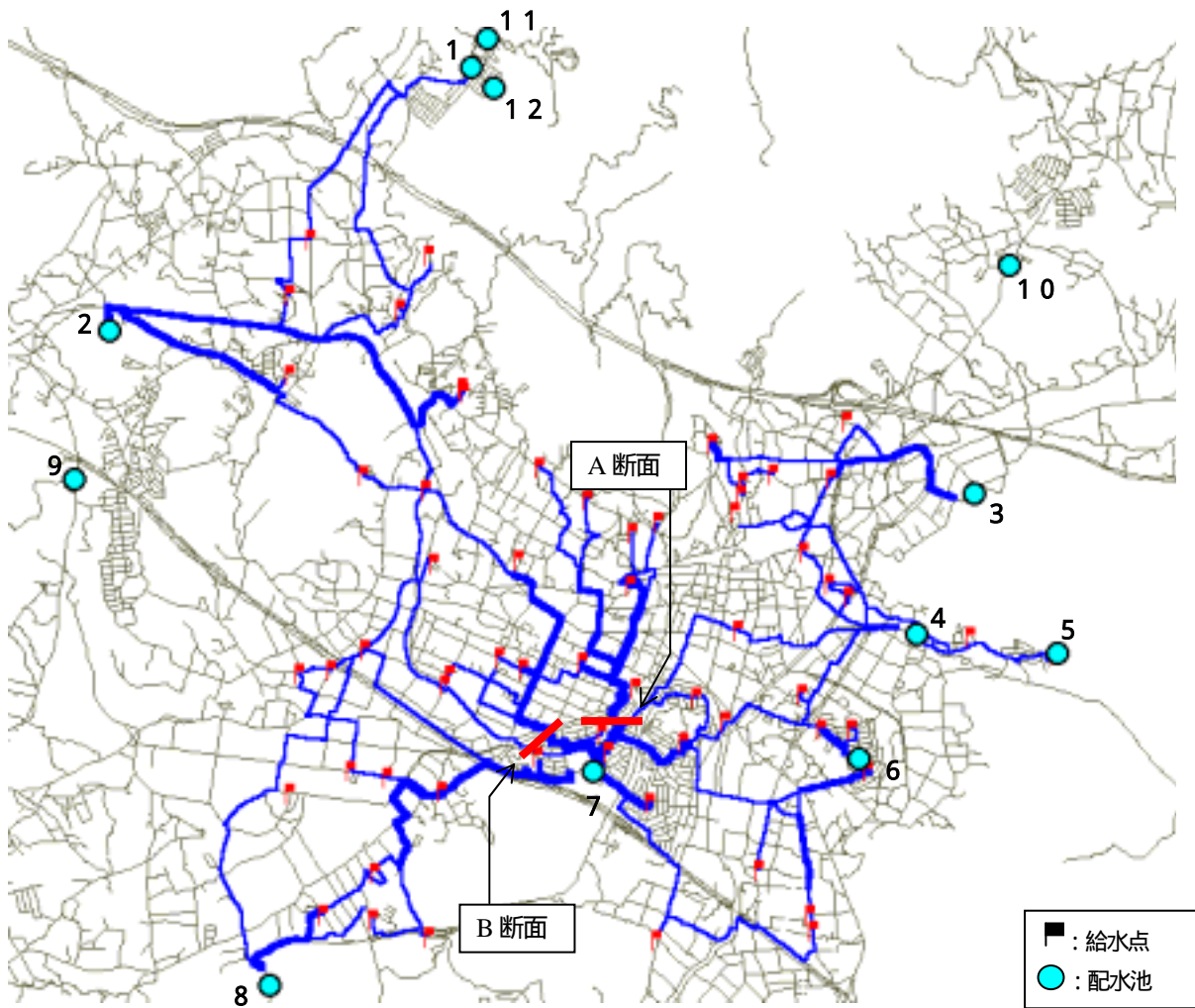


図 - 3 基本ケースの巡回の様子

住宅が存在するメッシュを居住地と考え、国勢調査 1km メッシュごとの人口をその中の 100m 居住地メッシュに配分して人口分布を与えた。その他の前提条件は以下のようなものである。

- 1) 一般の道路の走行速度 12 km / h
- 2) 住民一人当たりの水の需要量 3 ㍓ / 日
- 3) 配水車 1 台当たりの容量 4 t / 台
- 4) 配水車 1 台当たりの運用時間 8 時間 / 日
- 5) 配水車が水の補給にかかる時間 10 分 / 回
- 6) 給水点で給水にかかる時間 1 分 / 10 ㍓

まず、既存の研究を参考に住民の運搬可能距離を 500 m と設定して⁹⁾ 給水点配置問題を解いた。その時の給水点立地数は 61 箇所となり、各給水点の配置と、各給水点が受け持つ住民の居住地は図 - 2 のようになった。

(2) 基本ケースの解

上記の前提条件のもとで、既存の 12 カ所の配水池と道路がまったく破壊していない状態で配水車巡回問題を解いた結果、12 カ所のうち 8 カ所の配水池が使われていた。この解を基本ケースと呼び、

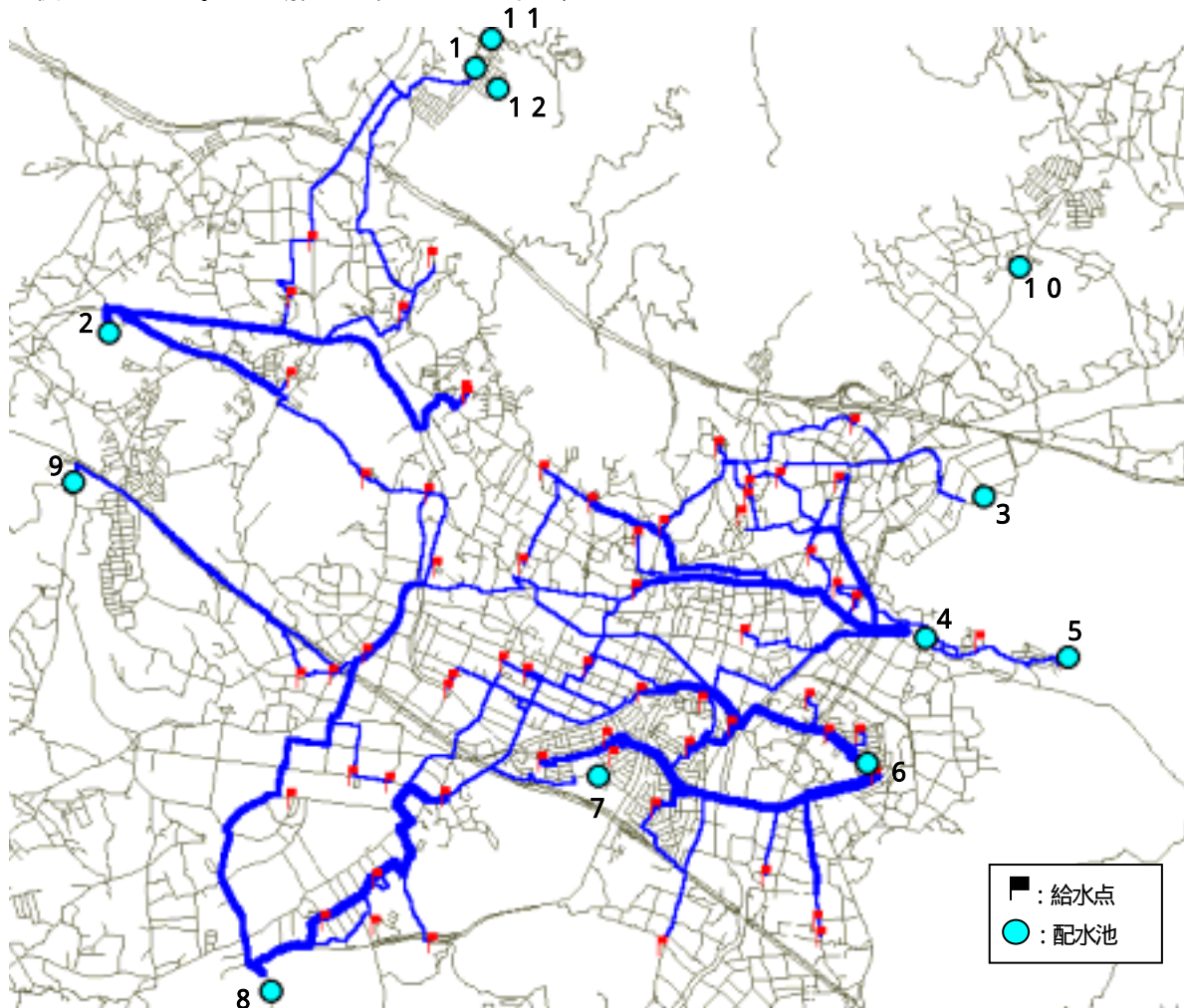


図 - 4 配水池 7 が破壊した時の巡回の様子

図 - 3 に巡回の様子を示す。線が太いほどその道路の使用回数が多いことを表している。この図から配水池 7 から北方向と西方向へ向かう道路の使用回数が特に高いことが分かる。表 - 1 に基本ケースにおける各配水池での水の使用量を示す。

次に、この基本ケースをもとに設定を変えてシミュレーションし、総巡回距離や、巡回路、必要な配水車台数がどのように変化するかを観察する。

表 - 1 基本ケースにおける各配水池の使用水量

配水池	1	2	3	4	5	6	7	8
使用水量(m ³)	3.3	13.2	3.7	15.2	1.4	22.5	72.5	10.2

(3) 配水池の破壊による影響

基本ケースで使用された 8 つの配水池がそれぞれ、震災時に破壊して使えなくなった状況を想定してシミュレートする。その結果を表 - 2 に示す。表 - 1 と表 - 2 の比較により、基本ケースで最も多く水を補給していた配水池 7 が破壊した時、総配水時間の増加量が最大であるほか、配水池の破壊による総配水時間の伸びは基本ケースにおける



図 - 5 A、B断面の基本ケースの巡回の様子



図 - 6 A、B断面で落橋した場合の巡回の様子

使用量の順番にほぼ一致していることが分かった。また、配水活動に必要な配水車の台数は 32 台であるが、配水池 7 が破壊した時には、さらに 1 台多く必要となる。

図 - 4 に配水池 7 が破壊した時の巡回の様子を示す。図 - 4 より、配水池 7 に代わって配水池 4、6 など水補給を行っている様子が見える。また基本ケースでは使用されなかった配水池 9 が使用されている。さらに配水池 7 の周辺の南北方向の道路に代わって配水池 4、6 から伸びる東西方向の道路の使用頻度が高くなっている。

橋があれば、道路ネットワーク全体としてはそれほどパフォーマンスが低下しないことによると思われる。

図 - 5 に、基本ケースの A、B 断面の巡回の様子を、図 - 6 に、A、B 両断面で同時に橋が落橋した場合の巡回の様子を示す。後者から分かるように広範囲で橋が寸断されると、遠回りの代替路しか存在しなくなるために、総巡回距離が大きく増加する。また、いずれのケースでも、配水活動に必要な配水車の台数に変化はなく 32 台であった。

表 - 2 各配水池が壊れた場合の結果

破壊配水池	総巡回距離(km)	総配水時間(h)	配水車数(台)
基本ケース	149.7	254.22	32
1	150.1	254.25	32
2	154.4	254.61	32
3	150.5	254.28	32
4	152.6	254.46	32
5	149.9	254.24	32
6	159.2	255.01	32
7	199.5	258.37	33
8	154.9	254.66	32

(4) 落橋による影響

落橋により、道路が寸断された状況を想定してシミュレートする。図 - 3 で多く使われていた配水池 7 から北と西に伸びる道路上の A 断面と B 断面にある橋がそれぞれ落橋した場合と、両方の断面の橋が同時に落橋した場合の計算結果を表 - 3 に示す。表 - 3 より、A、B 断面の橋がそれぞれ単独で寸断されても、総巡回距離はほとんど変化しない。これは、落橋の近くに代替できるような

表 - 3 A、B断面で落橋した場合の結果

落橋断面	総巡回距離(km)	総配水時間(h)	配水車数(台)
基本ケース	149.7	254.22	32
A断面	149.7	254.22	32
B断面	151.2	254.34	32
A&B断面	160.6	255.13	32

5. おわりに

本研究では事前の防災対策が緊急時給水作業に及ぼす影響を明らかにするため、配水車巡回モデルを用いて、様々な被災状況に対するシミュレーションを行う方法を提案した。東広島市西条地区のケーススタディーの結果、以下の知見を得た。

- 基本ケースで利用頻度の高い配水池を明らかにした。そのような配水池が破壊した時ほど、総巡回距離が伸びるため、耐震化の必要性が高い。
- 被害の組み合わせによって、配水池の利用回数や、道路の使用頻度が大きく異なるため、耐震化を考える時は、利用頻度の高い配水池と、その周辺の使用

頻度の高い方向の道路を同時に耐震化しなければならぬ。

- ・ 落橋で道路が寸断されても、その寸断地域が狭ければ、総巡回距離はほとんど変わらない。しかし、広範囲で落橋が起ると、総巡回距離は悪化する。道路ネットワーク内での位置を考慮して耐震化すべき橋梁を選ぶ必要がある。
- ・ 想定した被災条件では、配水池から給水点までの配送時間よりも、給水点で水の給水活動や、配水池での水の補給活動に要する時間の制約の方が大きく、配送時間の増加は、必要配水車数に影響を与えるほどのものではない。

これらの知見は、限られた感度分析によるものであるから、今後自治体がより多くのケースに対する感度分析を実施して、この地域に特有の法則性を見出していくことが必要である。本研究で提案したモデルはパソコンレベルで実行可能であり、その活用が望まれる。

参考文献

- 1) 増井忠幸、百合本茂、片山直登：ロジステックスのOR、積書店、1998。

- 2) 谷口栄一、根本敏則：シティロジステックス、森北出版、2001。
- 3) 山田忠史、則武通彦、谷口栄一、多賀慎：物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用、土木学会論文集、No.632、IV-45、pp.41-50、1999。
- 4) 中川大、若山真樹、伊藤雅：シミュレーションを用いた震災時の緊急物資輸送計画に関する研究、土木計画学研究・論文集、No.14、pp.353-360、1997。
- 5) 岡部和広、徳永幸之、須田熙：中継基地と走行速度が救援物資配送時間に与える影響の分析、土木計画学研究・論文集、No.15、pp.332-328、1998。
- 6) 首藤敦、徳永幸之：災害時緊急物資輸送計画に影響を与える要因の分析、土木計画学研究・講演集、No.23(1)、pp.541-544、2000。
- 7) 首藤敦、徳永幸之：被災状況と対応策に応じた救急物資配送計画の検討、土木学会論文集、No.695、IV-54、pp.67-75、2002。
- 8) Erlenkotter,D: A dual based procedure for uncapacitated facility location, Operations Research, Vol.26, pp.992-1009,1978.
- 9) 奥村誠、吉田英雅：震災時の水運搬能力と水利用、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。

緊急給水に対する事前防災対策の影響分析手法*

中島和樹**、奥村誠***、塚井誠人****

本研究は、緊急時の給水問題を給水点配置問題と配水車による車両巡回問題の複合問題として定式化する。前者は全ての居住地を運搬可能範囲内に収め、かつ、給水点の個数が最小になる給水点の配置場所を求める問題である。後者は給水点配置問題によって決定した給水点を、何台かの配水車が巡回するときの総距離を最小にする問題である。この問題に対してヒュ-リスティック解法を援用して効率的な緊急給水方法を算定する手順を確立する。この計算手順をもしいた感度分析を広島県東広島市西条地区に適用し、配水池や橋梁の破壊が緊急時の給水作業にもたらす影響を算定して、耐震化の効果を分析する手法を示す。

Analytical Method of the Pre-disaster Measures for Emergent Water Supply*

By Kazuki NAKASHIMA, Makoto OKUMURA, Makoto TSUKAI

In this paper, we formulate the emergent water supply problem as a compound problem of a facility location problem to determine water supplying points, and a vehicle routing problem. The former is a problem minimizes the number of supplying water points with the condition of covering of all residence place within the limit distance for water carrying. The latter is a problem which makes minimizes the total vehicle distance to distribute water to all water supplying points determined above the facility location problem. Using heuristic methods, a calculation procedure to propose efficient water supply work in an emergency is established. We propose a sensitivity analysis based on this procedure to investigate the influence of the destructions of water storages and bridges on the water supply work is calculated, and the effect of the pre-disaster earthquake-proof countermeasures for these facilities. The applicability of the method is illustrated by a case study in the Saijo area in Higashi-Hiroshima City.
