

災害時のサービス水準を考慮した水供給方策に関する考察

喜多秀行*・谷本圭志*・花井俊文**

* 鳥取大学工学部社会開発システム工学科

** 株式会社 新日

要 旨

これまで生活基盤サービス供給施設整備の多くは、個々のサービス供給施設（手段）の供給量を用いた指標に基づいて実施されてきた。しかし昨今では利用者の立場に立った供給手段の整備が求められており、その方策の一つとして供給対象の地域の属性や利用者の属性に適合した供給手段を組み合わせることで必要なサービス水準を確保することが考えられる。本研究では、耐震水道と応急給水による水供給手段を組み合わせる震災時の水供給サービスの施設整備の方法について検討する。

キーワード：サービス水準、水供給、ライフライン、災害対策

1. はじめに

これまで生活基盤サービス供給施設（手段）の多くは、供給者側の観点に立った指標に基づいて整備されてきた。それらの指標としては主に個々の供給施設（手段）の供給量を用いられており、道路整備においては道路の整備延長、公園整備では1人当たりの公園面積などがその例である。震災時の水供給施設についても水道の耐震化率などを用いて整備を実施している。生活基盤サービスの水準が十分に確保されていなかった時代においては供給者側の観点に立った指標が利用者のニーズを代表していたと考えられ、その指標に基づいた生活基盤サービス供給施設の整備は合理性を有していたであろう。しかし、生活基盤サービスの水準がある程度確保された現在、サービスの内容や利用のし易さ、供給に要する費用の抑制など、利用者の観点からのサービス供給施設の整備が求められている。このニーズに応えるための一つの方策として、供給対象地域や利用者の属性に適合した供給施設を整備することで利用者が必要

としているサービス水準（供給量）を確保することが考えられる。

震災時における水供給手段としては、水道以外にも井戸、ペットボトル、応急給水による配給、備蓄水、河川水などが有効な供給手段となりうる。ことが阪神・淡路大震災などの過去の災害で明らかになっている。従って、震災時の水供給計画を検討する上では、水道という単一の手段を耐震化することによって必要な水供給サービス水準を確保するのではなく、地域や利用者にとって適当な水供給手段を組み合わせることで必要なサービス水準を確保するという視点が重要となる。しかし複数の手段を組み合わせることで必要なサービス水準を確保する場合、個々の手段の供給量をどのように評価するかという課題が生じる。

そこで本研究では、震災時の水供給サービスを対象として必要なサービス水準（水供給量）を所与とし、複数の供給手段によってその水準以上のサービス供給を実現することを想定する。その下で、各々の供給手段の供給量の評価を行い、その供給量を確保するための供給手段の整備量を決定する方法につ

いて検討する。具体的には、供給対象の地域属性及び利用者の属性といった制約の下で、利用者がどの供給手段から水をどれだけ入手するかについてモデル化を行う。その上で、水供給手段の整備によって増大する利用者の水入手量に対する支払意思額の増分を地域で集計した値を当該供給施設の整備に関する便益とし、その便益と供給手段の整備費用の差が最大となるような供給施設の供給量及びその供給量を確保する各々の施設の整備量を決定するアプローチを提案する。

2. 本研究の基本的な考え方

2.1 震災時の水供給サービス方策

地震が発生した場合、通常時の主要な供給手段として機能している水道が供給不能となることがある。その原因としては、水道管の物理的な損傷・破損と機能的な障害、すなわち「物的被害」と「機能被害」の二つがある。水道管の物的被害を防ぐための施設整備として水道管の耐震化が、機能被害については水道管のネットワーク化などがあり、震災時に水道水を確実に供給するためにはこれらを実施していく必要がある。しかしながら、その実施には多額の費用が必要であり、施設の整備範囲の決定が課題となる。これに関して厚生省では費用便益分析を用いた水道の耐震化範囲の検討を開始する気運がある。これは、費用便益比（もしくは費用便益差）が最大となるような最適な耐震化範囲を決定するものである。

水道以外の水道供給手段として行政が給水車によって断水地域に水を配給する「応急給水」も震災時には重要な役割を担う。応急給水の整備を対象とした研究として、吉田ら（吉田・奥村，1998）などがある。吉田らは応急給水の拠点の適正配置問題をGA（遺伝的アルゴリズム）を用いて検討している。ここでは応急給水エリア内での耐震水道管の配置を所与とし、その下での給水拠点の適正配置を導出している。しかし、耐震水道による利用者への水の供給はあくまで応急給水を通じて行われるとしており、水の供給手段としては応急給水のみに着目している。

このように、従来の研究では単一の供給手段の供給量、整備範囲を評価するものが主であり、複数の供給手段がある場合それらの組み合わせ考慮するのは少ない。

これに対し亀田ら（亀田・能島，1997）や塩野ら（塩野・中林・高野，1995）は、震災時の水供給サービスが複数の水供給手段から構成されるとした上で、その水供給サービスの被害を評価し、指標化した「生活への影響度」を提案している。しかし、生活への

影響度は水供給手段が受ける被害の大きさに依存するとともに、利用者の属性にも依存すると考えられる。例えば、応急給水では水を運搬するための十分な運搬能力を利用者が有しているかどうかによって生活への影響度も異なってくる。これに関して上述の「生活への影響度」には利用者属性が反映されていない。また、その「影響度」を用いて、各々の水供給手段をどれだけ整備すべきかという点についても明らかではない。

本研究では、震災時の水の供給手段として水道と応急給水の二つを取り上げる。水道は（全く耐震化が施されていない）既設水道管を耐震化することで震災時に水道から水が入手可能な利用者を増加させることができる。しかし耐震化に要する費用は多額であるため、費用の大きさによっては応急給水による水供給が適当となりうる。一方で、応急給水には水の運搬にマンパワーを要する。このため、応急給水の拠点が設置される道路（以後、「緊急輸送道路」と呼ぶ）が地域に十分整備されていなかったり、十分な運搬能力をもっていない利用者が多く居住する地域では、耐震水道による水供給が適当となりうる。

従って、耐震水道と応急給水による供給量のバランスを図った上で、各々の手段の整備を行うことが重要となる。そのバランスは、利用者属性、地域属性に依存する。本研究では、利用者属性として応急給水によって配給される水の運搬能力、地域属性として応急給水車が震災時にも円滑な通行を保証する緊急輸送道路の整備水準（密度）を取り上げる。利用者は、緊急輸送道路にアクセスできれば応急給水によって必要分の配給を待ちなしで受けることができると仮定する。すなわち、応急給水は利用者の混雑等に伴う給水量不足、待ちが生じないとし、応急給水拠点の配置は明示的に考慮しないものとする。また、緊急輸送道路の整備水準は所与として一定であるとする。このことは、応急給水による供給量を所与とし、水道の耐震化整備をどの範囲まで実施するかという問題を本研究では取り上げることを意味している。

地震発生直後の混乱が終息し、応急給水という「緊急システム」がある程度正常に稼動するのは、地震発生時から概ね3日後と言われており、本研究ではこの地震発生時から概ね3日後の応急、復旧期を対象とした水供給手段の整備について検討する。水道の耐震化など地域に防災整備を行った場合、長期的には地域の安全性に応じた人口移動等を考慮する必要があるが、本研究ではこのような長期的な要因を考慮しないものとする。

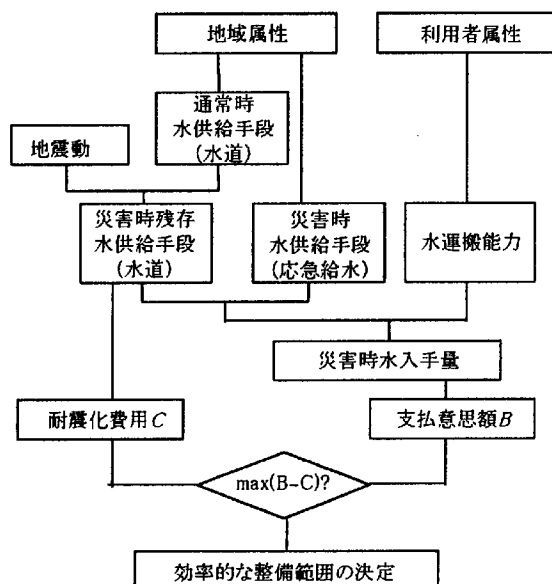


Fig.1 Flowchart for decision making of optimal extent of upgrading waterpipe

2.2 本研究の検討の流れ

本研究の検討のフローをFig.1に示す。地震が発生した場合、一部の通常時水供給手段（水道）が破損することにより、利用可能な供給手段は災害時残存水供給手段と災害時水供給手段（応急給水）になる。水道管を耐震化することにより水道管が被災する確率が減少し、災害時残存水供給手段（水道）から水を手入できる利用者が増加しうる。

利用者は応急給水からも水を手入することが可能であるが、その際の水の運搬距離は地域属性である緊急輸送道路の整備密度に依存する。緊急輸送道路の整備密度は利用者の水の運搬距離を決定し、運搬距離に対する水の運搬可能量は、個人属性である利用者の水の運搬能力に依存する。

これらの制約の下で利用者は自らの効用が最大となるようにこれらの二つの水供給手段からの水入手量を決定し、この入手量に対する支払意思額が決まる。地域全体で集計した耐震化に伴う支払意思額の増分がその供給量（＝入手量）を確保することの便益であり、その値は水道が利用可能となる利用者数、すなわち、耐震化の範囲に依存する。水道管の耐震化には費用がかかるため、便益と費用の差が最大となる耐震化の範囲を最適な耐震化範囲として決定することができる。このようにして決定された耐震化範囲は必要な水量を確保し、かつ供給対象地域において最大の純便益を達成する水道の耐震化の範囲である。

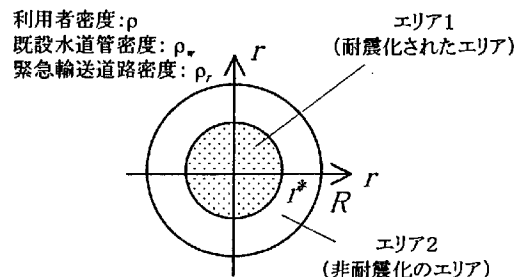


Fig.2 Hypothetical Study Area

3. 水供給対象地域と水入手行動のモデル化

3.1 水供給対象地域

本研究で検討の対象とする地域のモデルをFig.2に示す。検討の対象とする地域は中心に水道の配水地点がある半径 R の円状の地域であり、その地域に居住する利用者の密度を ρ （利用者数/地域の面積）とする。水道管は密度 ρ_w （敷設延長/地域の面積）で敷設されている。この地域に配水地点を中心に水道を耐震化することを考える。耐震化した水道管が敷設された地域を「エリア1」と呼び、Fig.2では半径 r^* で囲まれる地域を指す。一方、Fig.2において半径 r^* から R までの地域を「エリア2」と呼び、耐震化されていない水道管が敷設されている地域を指す。

応急給水は地域内に指定された緊急輸送道路を通行して配給する。この緊急輸送道路は密度 ρ_w （整備延長/地域の面積）で整備されているとする。先述したように、利用者は緊急輸送道路にアクセスすれば応急給水のサービスを受けることができると仮定する。

3.2 耐震化費用

本研究で取り上げる水道管の耐震化方法として、耐震性の高い新管を既設管内に挿入する既設管内挿入工法（日本水道協会，1997）を想定する。挿入する新管の規模は既設管の断面積の口径が大きいほど、また延長が長いほど大きいと考えられることから、既設管の耐震化に要する費用（以後「耐震化費用」と呼ぶ）は既設水道管の口径と長さに比例すると仮定する。以下に耐震化費用を算出する。

通常時における1人当たりの計画水供給量を q とする。 r 地点を通過している水道管内に流れている水量は r 地点に居住している利用者へ供給する水量の

みならず、中心からの距離が $[r, R]$ の地点に居住している利用者に供給する水量が流れている。従って r 地点を通過している水道管内に流れている水量は次式で与えられる。

$$\rho\pi R^2 \times q - \rho\pi r^2 \times q = \rho\pi q(R^2 - r^2) \quad (1)$$

一方、 r 地点から $(r+dr)$ 地点までの間における地域全体における水道管の延長の増分は、次式で与えられる。

$$\rho_w\pi(r+dr)^2 - \rho_w\pi r^2 = 2\rho_w\pi r dr + \rho_w\pi dr^2 \quad (2)$$

地点間の水道管の全延長の増分を地点間の距離 dr で除すことにより、地域全体における水道管の本数の増分を次式のように得る。

$$\frac{2\rho_w\pi r dr + \rho_w\pi dr^2}{dr} = 2\rho_w\pi r + \rho_w\pi dr \quad (3)$$

$dr \rightarrow 0$ とすると上式 $\rightarrow 2\rho_w\pi r$ である。すなわち r 地点を通過する既設水道管の本数を $n(r)$ とすると、その導関数 $n'(r)$ について次式が成立する。

$$n'(r) = 2\rho_w\pi r \quad (4)$$

ここで $n(0) = 0$ の初期条件の下で上式を解くと、次式を得る。

$$\begin{aligned} n(r) &= \int 2\rho_w\pi r dr \\ &= \rho_w\pi r^2 \end{aligned} \quad (5)$$

(1) 式、(5) 式より、 r 地点を通過する既設水道管1本あたりに流れている水量は、次式で表される。

$$\frac{\rho\pi q(R^2 - r^2)}{\rho_w\pi r^2} \quad (6)$$

ここで耐震化費用は既設水道管の(口径)×(長さ)に比例するとの仮定より、半径 r^* まで耐震化を実施した場合の耐震化費用 $C(r^*)$ は、次式で与えられる。

$$C(r^*) = c \int_0^{r^*} \left\{ \frac{\rho\pi q(R^2 - r^2)}{\rho_w\pi r^2} \right\}^{\frac{1}{3}} \rho_w\pi r^2 dr \quad (7)$$

ただし c は定数である。1/3乗は、口径が水量の1/3乗に比例することを示している。上式より、耐震化の範囲を拡大($r^* \rightarrow$ 大)すると耐震化する水道管の延長が長くなるとともに $[r^*, R]$ 地点(r^* 地点より「下流」側の地点)での水量が減少する。よって耐震化費用は定性的には、Fig.3に示すような変曲点をもつ曲線として得られる。

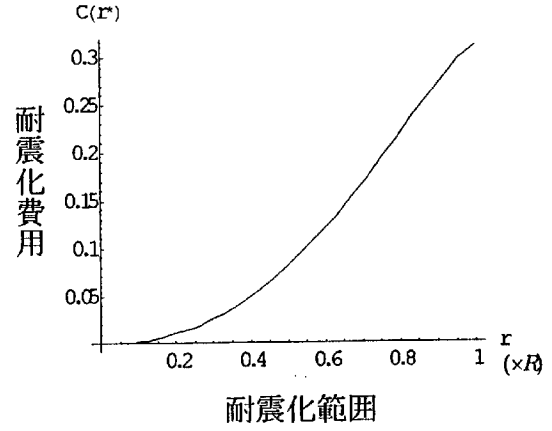


Fig.3 Cost function

3.3 利用者の水入手行動

(1) 利用者の水入手行動モデルの定式化

利用者の水入手行動は時間及び所得による制約を受ける。時間及び所得の制約は次式で表すことができる。

$$\begin{cases} p_1 x_1 + Z \leq I \\ a_2 x_2 + l \leq T \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 p_1 :水道料金、 x_1 :水道からの水の入手量、 x_2 :応急給水からの水の入手量、 Z :合成財(ニューメレール)、 I :所得、 a_2 :水1単位を応急給水で得る場合の水の運搬時間、 l :余暇時間、 T :総利用可能時間である。なお、 x_1 と x_2 は完全に代替可能であるとする。利用者が必要とする水量を x とすると、利用者は以下の制約に直面する。

$$x_1 + x_2 \geq x \quad (9)$$

以下では利用者が(8)式、(9)式の制約の下で自己の効用 $u(x_1 + x_2, Z, l)$ の最大化行動を行うと仮定する。すると、利用者の水入手行動は次のように定式化される。ここに a_2 は地域属性、個人属性を反映しうパラメータであり、この値によって利用者の効用が変化する。また、 x は必要な水供給サービスと解釈することができる。ただし以下では簡単のため、 $x_1 + x_2 \geq x$ の制約を外して検討する($x=0$ とする)。

$$\begin{aligned} V(p_1, a_2, I, T) &= \max_{x_1, x_2, l, Z} \{u(x_1 + x_2, l, Z)\} \\ \text{subject to } &\begin{cases} p_1 x_1 + Z \leq I \\ a_2 x_2 + l \leq T \\ x_1 + x_2 \geq x \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 需要関数, 間接効用関数の導出

(10) 式の下で決定される供給手段別の水の需要関数及び間接効用関数を導出する.

本研究では所得に対する線形性を仮定した準線形効用関数を用いる. 水量($x_1 + x_2$)と余暇時間 l については代替性を一般化する. すなわち α ($\alpha \leq 1$), β_1, β_2, m をパラメータとして効用関数を, 以下のよう表す.

$$u(x_1 + x_2, l, Z) = (\beta_1(x_1 + x_2)^\alpha + \beta_2 l^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} + mZ \quad (11)$$

この効用関数について所与の制約条件の下での最大化問題をラグランジュ乗数法を用いて定式化すると, ラグランジュ関数 L は次式となる.

$$L = (\beta_1(x_1 + x_2)^\alpha + \beta_2 l^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} + mZ + \lambda_1(I - p_1 x_1 - Z) + \lambda_2(T - a_2 x_2 - l) \quad (12)$$

ここに λ_1, λ_2 は, ラグランジュ乗数である. キューン=タッカーの定理を用いて需要関数 x_1, x_2 及び間接効用関数 V を導出する. ただし, $x_1, x_2, l, Z \geq 0$ を仮定する.

1. 水道から水入手が可能な利用者 ($x_1, x_2 \geq 0$)

(a) $x_1 > 0, x_2 = 0$ のケース

$$l = T \quad (13)$$

$$Z = I - p_1 T \frac{((p_1 m)^{\frac{-\alpha}{\alpha-1}} - \beta_1^{\frac{-1}{\alpha-1}})^{\frac{-1}{\alpha}}}{\beta_1^{\frac{1}{\alpha-1}} \beta_2^{\frac{-1}{\alpha}}} \quad (14)$$

$$x_1 = T \frac{((p_1 m)^{\frac{-\alpha}{\alpha-1}} - \beta_1^{\frac{-1}{\alpha-1}})^{\frac{-1}{\alpha}}}{\beta_1^{\frac{1}{\alpha-1}} \beta_2^{\frac{-1}{\alpha}}} \quad (15)$$

$$\text{subject to } a_2 \leq \frac{((p_1 m)^{\frac{1-\alpha}{1-\alpha}} - \beta_1^{\frac{1-\alpha}{1-\alpha}})^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}}{\beta_2^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V(p_1, I, T) &= \left\{ \beta_1 \left\{ T \frac{((p_1 m)^{\frac{-\alpha}{\alpha-1}} - \beta_1^{\frac{-1}{\alpha-1}})^{\frac{-1}{\alpha}}}{\beta_1^{\frac{1}{\alpha-1}} \beta_2^{\frac{-1}{\alpha}}} \right\}^\alpha + \beta_2 T^\alpha \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \\ &+ \left\{ I - p_1 T \frac{((p_1 m)^{\frac{-\alpha}{\alpha-1}} - \beta_1^{\frac{-1}{\alpha-1}})^{\frac{-1}{\alpha}}}{\beta_1^{\frac{1}{\alpha-1}} \beta_2^{\frac{-1}{\alpha}}} \right\} m \end{aligned} \quad (17)$$

(b) $x_1 = 0, x_2 > 0$ のケース

$$Z = I \quad (18)$$

$$l = \frac{T}{a_2 \left(\frac{a_2 \beta_2}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} + 1} \quad (19)$$

$$x_2 = \frac{T}{a_2 + \left(\frac{\beta_1}{a_2 \beta_2} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \quad (20)$$

$$\text{subject to } a_2 \geq \frac{((p_1 m)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} - \beta_1^{\frac{1}{1-\alpha}})^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}}{\beta_2^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} V(a_2, I, T) &= \left\{ \beta_1 \left\{ \frac{T}{a_2 + \left(\frac{\beta_1}{a_2 \beta_2} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \right\}^\alpha + \beta_2 \left\{ \frac{T}{a_2 \left(\frac{a_2 \beta_2}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} + 1} \right\}^\alpha \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \\ &+ mI \end{aligned} \quad (22)$$

(b)のケースは水道から水が入手可能であっても応急給水から水を手入する場合である. この場合, 水道を耐震化をしても水道から水を手入する利用者はいない.

2. 水道から水を手入可能でない利用者 ($x_1 = 0, x_2 \geq 0$)

$$V_0(a_2, I, T) = \max_{x_2, l, Z} \{u(x_2, l, Z)\}$$

$$\text{subject to } \begin{cases} Z \leq I \\ a_2 x_2 + l \leq T \end{cases} \quad (23)$$

$$u(x_2, l, Z) = (\beta_1 x_2^\alpha + \beta_2 l^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} + mZ \quad (24)$$

この問題を解くと, 以下の需要関数, 間接効用関数が導出される.

$$Z = I \quad (25)$$

$$l = \frac{T}{a_2 \left(\frac{a_2 \beta_2}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} + 1} \quad (26)$$

$$x_2 = \frac{T}{a_2 + \left(\frac{\beta_1}{a_2 \beta_2} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} V_0(a_2, I, T) &= \left\{ \beta_1 \left\{ \frac{T}{a_2 + \left(\frac{\beta_1}{a_2 \beta_2} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}} \right\}^\alpha + \beta_2 \left\{ \frac{T}{a_2 \left(\frac{a_2 \beta_2}{\beta_1} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} + 1} \right\}^\alpha \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \\ &+ mI \end{aligned} \quad (28)$$

(3) 水道からの水入手の便益評価

耐震化しない場合に比べて耐震化によって水道から水が入手可能となることで増加する利用者の支払意思額 (WTP) の増分を地域で集計した値を便益 B として以下のように求める. ここで注意すべきは, (22) 式と (28) 式が等価であることから, 3.3(2)の(b)のケースでは全ての利用者について $WTP = 0$ となり, $B - C = -C \leq 0$ となる. よって最大の純便益を達成する r^* は $r^* = 0$ であることが明らかである. 以後, 本研究では3.3.(2)における(a)が成立するケースに限って議論を進める.

$$WTP = \frac{V - V_0}{m} \quad (29)$$

3.4 地域属性、利用者属性

水道から水を手入れできない地点に居住する利用者は、応急給水地点と居住地の間、水を運搬することで水を手入れする必要がある。緊急輸送道路の整備密度が高いほど応急給水によって得た水を運搬する距離が短くなる。地域内での緊急輸送道路の延長は $\rho_r \pi R^2$ である。緊急輸送道路から距離 $[t, t + dt]$ に居住している利用者は $2\rho \times \rho_r \pi R^2 dt$ となる¹。緊急輸送道路へのアクセス距離が最も長い利用者が水を運搬する距離（片道）を t^* とすると地域内の利用者数が $\rho \pi R^2$ であることに留意すれば次式が成立する。

$$\int_0^{t^*} 2\rho \rho_r \pi R^2 dt = \rho \pi R^2 \quad (30)$$

$$\Leftrightarrow t^* = \frac{1}{2\rho_r} \quad (31)$$

従って、地域内の全ての利用者についての緊急輸送道路までのアクセス距離（片道）の総和を求めると、次式のようになる。

$$\int_0^{t^*} 2t \rho \rho_r \pi R^2 dt = \frac{\rho \pi R^2}{4\rho_r} \quad (32)$$

地域の1人当たりの運搬（アクセス）距離 $f(\rho_r)$ は総運搬（アクセス）距離を利用者数で除すことにより次式のように得る。

$$\begin{aligned} f(\rho_r) &= \frac{\rho \pi R^2}{4\rho_r} \times \frac{1}{\rho \pi R^2} \\ &= \frac{1}{4\rho_r} \end{aligned} \quad (33)$$

次に、運搬距離が t の場合に一往復で運搬可能な水量を $x_2^0 = x_2^0(t)$ とすると、水量 x_2 を運搬するのに必要な往復回数 $g(t)$ は、次式となる。

$$g(t) = \frac{x_2}{x_2^0(t)} \quad (34)$$

上式より、水量 x_2 を運搬するのに必要な運搬距離は $g(t) \times 2t$ で表されるため、運搬時の歩行速度を v とすると水量 x_2 を得るのに要する時間 $T(t)$ は次式となる。

$$T(t) = \frac{2t}{x_2^0(t)v} x_2 \quad (35)$$

緊急輸送道路網の密度が ρ_r のときの運搬距離が $f(\rho_r)$ であるから、密度 ρ_r の下で水量 x_2 を得るのに要する時間は $T(f(\rho_r))$ である。また、奥村らの研究

¹ ただし、緊急輸送道路が直線に整備されているとして近似的に求めた値である

（奥村・吉田，1997）を参考に一往復あたりの水の運搬量と運搬距離について $x_2^0(t) = a/t$ という関係を仮定すると、水量 x_2 を運搬するのに必要な運搬時間は次式で表される。ここで、 a は一往復で運ぶことのできる運搬量に関するパラメータであり、個人属性を表すものである。 a が大きいほど一往復の運搬で運べる水の量が多い。

$$\begin{aligned} T(f(\rho_r)) &= \frac{2f(\rho_r)}{x_2^0(f(\rho_r))v} x_2 \\ &= \frac{2f^2(\rho_r)}{av} x_2 \end{aligned} \quad (36)$$

4. 水供給方策の検討

4.1 耐震化範囲の決定

(1) 水道から水が入手可能となる利用者数

耐震化の範囲によって水道から水が入手可能となる利用者数が変わる。以下では耐震化の半径 r^* と水道から水が入手可能となる利用者数の関係を求める。

水道管の被災は任意地点において定常性、独立性、稀少性を満たすと考えられる。この下での被災確率はポアソン分布に従うと仮定することができる。従って、耐震水道管の被災率を λ 、一般水道管の被災率を μ ($0 \leq \lambda < \mu \leq \infty$) とすると、エリア1 ($0 \leq r \leq r^*$) の利用者が水道から水が入手可能となる確率は半径 $[0, r]$ の間で水道管が被災しない確率 $e^{-\lambda r}$ で与えられる。また、このエリアに居住している利用者数は $\int_0^r 2\pi r \times \rho dr$ である。よってエリア1全体で水道サービスを受けられる利用者数は次式となる。

$$\rho \int_0^{r^*} e^{-\lambda r} 2\pi r dr = \frac{2\pi \rho}{\lambda^2} (1 - e^{-\lambda r^*} (\lambda r^* + 1))$$

ここで $\lambda \rightarrow 0$ とすると耐震化した水道管は全く被災しない状況となり、この場合水道から水が入手可能となる利用者数は次式のようになる。

$$\frac{2\pi \rho}{\lambda^2} (1 - e^{-\lambda r^*} (\lambda r^* + 1)) \rightarrow \rho \pi r^{*2} \quad (\lambda \rightarrow 0) \quad (37)$$

エリア1と同様に、エリア2 ($r^* \leq r \leq R$) において水道から水が入手可能となる利用者数は次式で表される。

$$\begin{aligned} &\rho e^{-\lambda r^*} \int_{r^*}^R e^{-\mu(r-r^*)} 2\pi r dr \\ &= \frac{2\pi \rho}{\mu^2} e^{-\lambda r^*} (-e^{-\mu(R-r^*)} (1 + \mu R) + \mu r^* + 1) \end{aligned} \quad (38)$$

ここで $\mu \rightarrow \infty$ とすると、耐震化していない水道管はすべて被災するという状況となり、水道から水が入手可能となる利用者数は次式のようになる。

$$\frac{2\pi\rho}{\mu^2}e^{-\lambda r^*}(-e^{-\mu(R-r^*)}(1+\mu R)+\mu r^*+1) \rightarrow 0 \quad (\mu \rightarrow \infty) \quad (39)$$

以上より地域全体（エリア1とエリア2）で水道から水が入手可能となる利用者数 A は次式で表される。

$$A = \frac{2\pi\rho}{\lambda^2}(1 - e^{-\lambda r^*}(\lambda r^* + 1)) + \frac{2\pi\rho}{\mu^2}e^{-\lambda r^*}(-e^{-\mu(R-r^*)}(1+\mu R)+\mu r^*+1) \quad (40)$$

耐震化が全く行われない状態において水道から水が入手可能となる利用者数は、 $r^* = 0$ だけ耐震化した場合での利用者数 A^0 により算出することができる。

$$A^0 = \frac{2\pi\rho}{\mu^2}(1 - e^{-\mu R}(\mu R + 1)) \quad (41)$$

(2) 耐震化範囲の導出

以上より、半径 r^* まで耐震化した場合に、地域全体の利用者について集計したWTPの増分が水道の耐震化の便益 $B(r^*)$ であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} B(r^*) &= WTP(A - A^0) \\ &= WTP\left(\frac{2\pi\rho}{\lambda^2}(1 - e^{-\lambda r^*}(\lambda r^* + 1))\right. \\ &\quad + \frac{2\pi\rho}{\mu^2}e^{-\lambda r^*}(-e^{-\mu(R-r^*)}(1+\mu R)+\mu r^*+1) \\ &\quad \left. - \frac{2\pi\rho}{\mu^2}(1 - e^{-\mu R}(\mu R + 1))\right) \end{aligned} \quad (42)$$

純便益 $Y(r^*)$ は便益と耐震化費用の差で与えられ次式で表される。

$$Y(r^*) = B(r^*) - C(r^*) \quad (43)$$

よって最大の $Y(r^*)$ を達成する r^* が求めるべき耐震化の半径である。

以下では簡単のため $\lambda \rightarrow 0, \mu \rightarrow \infty$ ((37) 式, (39) 式) の場合について検討する。この場合、利用者全体の支払意思額の増分 ($B(r^*)$) は、次式となる。

$$B(r^*) = WTP\rho\pi r^{*2} \quad (44)$$

また、この場合の純便益 $Y(r^*)$ は次式で表される。

$$Y(r^*) = WTP\rho\pi r^{*2} - C(r^*) \quad (45)$$

純便益が最大となる耐震化の半径 r^* は、 $\frac{\partial Y_0(r^*)}{\partial r^*} = 0, \frac{\partial^2 Y_0(r^*)}{\partial r^{*2}} < 0$ によって求めることができる。次式は1階条件を表した式である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial r^*} &= 2WTP\rho\pi r^* - (\rho\pi q)^{1/3}(R^2 - r^{*2})^{1/3}(\rho_w\pi r^{*2})^{2/3} \\ &= (2WTP\rho)^3 - \rho\rho_w^2 q(R^2 - r^{*2})r^* = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

2階条件 $\frac{\partial^2 Y}{\partial r^{*2}} < 0$ より、 r^* と R の大小関係を次式のように求めることができる。

$$0 \leq r^* < \frac{1}{\sqrt{3}}R \quad (47)$$

上式より、 r^* は R の近傍になりえないことが分かる。ただしここで注意すべきは、Fig.3に示すように耐震化費用は R の近傍で逡減しているため、 R において純便益が最大となる可能性がある。すなわち端点解が最適となりうる。従って (46) 式で導出された $r = r^*$ についての純便益と $r = R$ での純便益とを比較し、大きい純便益を得る半径が最適な耐震化の範囲となる。

4.2 数値例を用いた耐震化範囲の導出

(1) 運搬量 a と耐震化範囲 r^* の関係

以下では、水道から水が入手可能な各エリアごとの利用者数をそれぞれ (37) 式, (39) 式とし、かつ $\alpha=1/2, m=2$,他のパラメータを1として数値分析を行う。また $R=1$ と基準化する。運搬量 a と耐震化範囲 r^* の関係式は次式となる。

$$\begin{aligned} a &= -2(-1 + (r - r^3)^{\frac{1}{3}}) \\ \text{subject to } \begin{cases} a \leq 2 \\ 0 < r^* \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \end{cases} \end{aligned} \quad (48)$$

(48) 式をグラフで表したのがFig.4である。ここで、 $a \geq 2$ の場合が3.3(2)で示した (b) の場合に当てはまり、 $r^* = 0$ となる。Fig.4より運搬量に関するパラメータ a が大きくなるほど耐震化範囲が小さくなることが分かる。これは、1往復で運搬できる水の量が多くなると、応急給水による水の入手が容易となるため、水道の耐震化に伴う支払意思額の増分が小さくなり、狭い範囲の耐震化に留まると考えられる。

(2) 緊急輸送道路の整備密度 ρ_r と耐震化範囲 r^* の関係

(1)と同様にして緊急輸送道路の整備密度 ρ_r と耐震化範囲 r^* の関係式を導出すると、次式を得る。

$$\rho_r = \frac{(1 - (r - r^3)^{\frac{1}{3}})^{\frac{1}{4}}}{2^{\frac{3}{4}}}$$

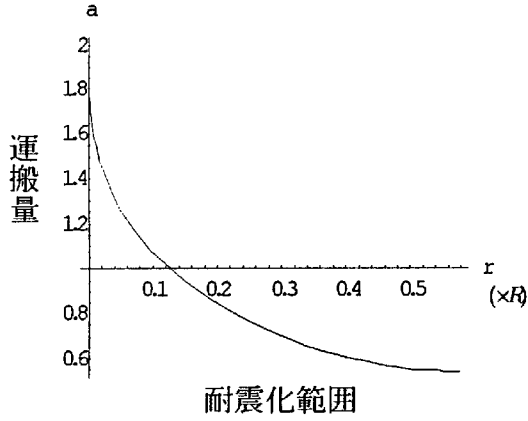


Fig.4 Optimal extent of upgrading waterworks for capability to carry water

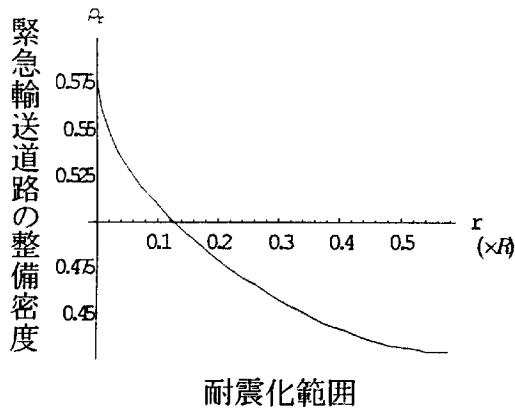


Fig.5 Optimal extent of upgrading waterworks for density of road network

$$\text{subject to } \begin{cases} 0 \leq \rho_r \leq \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{2}}} \\ 0 < r^* \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (49)$$

(49) 式をFig.5に表す。ここで、 $\rho_r \geq 1/\sqrt{2\sqrt{2}}$ の場合、3.3(2)の(b)の場合に当てはまり、 $r^* = 0$ となる。4.2(1)と同様に緊急輸送道路の密度 ρ_r に対する耐震化の範囲は減少関数となる。これは、 ρ_r が大きくなるほど利用者が緊急輸送道路までアクセスする距離が小さくなり、応急給水による水の入手が容易になる。これにより、水道の耐震化に伴う支払意思額の増分が小さくなり、狭い範囲の耐震化に留まると考えられる。

(3) 単一地域内における耐震化範囲の導出

緊急輸送道路の整備密度が異なる三つの地域（地域1,2,3）における整備範囲をそれぞれ検討する。任意の地域 $i(i = 1, 2, 3)$ の緊急輸送道路の整備密度 ρ_{ri} を $\rho_{r1} = 0.47, \rho_{r2} = 0.45, \rho_{r3} = 0.4$ として、それぞれ

純便益を表したものが次式である。

$$Y(r_1^*) = 0.3\pi r_1^2 - \int_0^{r_1^*} \left(\frac{\pi(1-r^2)}{\pi r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr \quad (50)$$

$$Y(r_2^*) = 0.33\pi r_2^2 - \int_0^{r_2^*} \left(\frac{\pi(1-r^2)}{\pi r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr \quad (51)$$

$$Y(r_3^*) = 0.4\pi r_3^2 - \int_0^{r_3^*} \left(\frac{\pi(1-r^2)}{\pi r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr \quad (52)$$

上式をFig.6~Fig.8に示す。Fig.6は $r(< R)$ において純便益の極大値をもち、その極大値を達成する r が最適（純便益が最大）となるケースである。Fig.7は $r(< R)$ において純便益の極大値をもつが R において純便益が最大となるケースである。このような場合が生起する理由は先述の通りである。Fig.8は純便益の極大値が存在せず、 R が最適となるケースである。

(4) 複数地域を対象とした耐震化範囲の導出

以下では、水道の耐震化に費やすことのできる予算 C が決まっており、その予算を各地域に配分して水道を耐震化する問題について検討する。対象とする地域は4.2(3)で取り上げた三つの地域とする。従って、各地域の純便益は(50)～(52)式で与えられる。耐震化による純便益が最も小さい地域の純便益を可能な限り大きくするよう予算を配分するとの規範を想定すると、この問題を次式のように定式化することができる。

$$\max_{r_1^*, r_2^*, r_3^*} \min[Y(r_1^*), Y(r_2^*), Y(r_3^*)]$$

subject to

$$\int_0^{r_1^*} \left(\frac{1-r^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr + \int_0^{r_2^*} \left(\frac{1-r^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr + \int_0^{r_3^*} \left(\frac{1-r^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr = C \quad (53)$$

上式を繰り返し計算することにより、 r_i^* を決定することができる。上式は以下のように書き表すことができる。

$$\epsilon \rightarrow \max \quad (54)$$

$$Y(r_1^*) \geq \epsilon \quad (55)$$

$$Y(r_2^*) \geq \epsilon \quad (56)$$

$$Y(r_3^*) \geq \epsilon \quad (57)$$

subject to

$$\int_0^{r_1^*} \left(\frac{1-r^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr + \int_0^{r_2^*} \left(\frac{1-r^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr + \int_0^{r_3^*} \left(\frac{1-r^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{3}} \pi r^2 dr = C \quad (58)$$

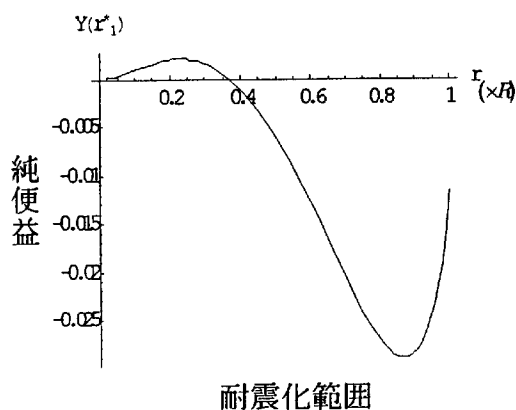


Fig.6 Net Benefit function in Region 1

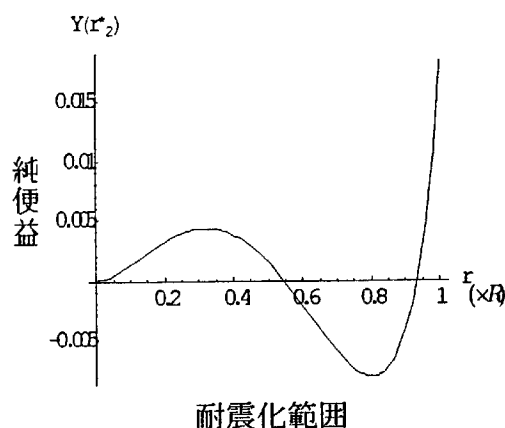


Fig.7 Net Benefit function in Region 2

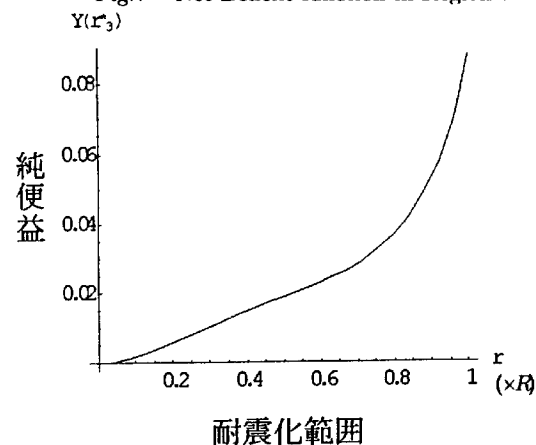


Fig.8 Net Benefit function in Region 3

$C = 0.3$ の場合について検討した結果をTable.1に示す。三つの地域のうち、耐震化によって達成する最大の純便益が最も小さいのは、緊急輸送道路の整備密度が最も低い地域1であり、まず地域1の純便益が最大となるように予算が配分され、その予算の下で耐震化が行われる。つまり、Fig.6の極大値を達成する r_1^* の範囲まで耐震化が行われる。次いで地域2の純便益を最大とするように予算が配分され、その予

Table.1 Budget allocation among three reagonis

i	ρr_i	r_i^*	$B(r_i^*)$	$C(r_i^*)$	$Y(r_i^*)$
1	0.47	0.23	1.56×10^{-2}	1.35×10^{-2}	2.11×10^{-3}
2	0.45	0.32	3.39×10^{-2}	2.95×10^{-2}	4.33×10^{-3}
3	0.40	0.87	3.47×10^{-1}	3.00×10^{-1}	4.69×10^{-2}

算の下で耐震化が行われる。地域2で最大の純便益を達成することのできる r_2 は R であるが、 R まで耐震化することは予算制約上実行不可能である。実行可能な r_2^* は極大値を達成している r_2 であり、この r_2^* が r_2^* となる。地域3については、地域1,2の水道を耐震化した後の予算の残額を用いて耐震化が行われる。

このように、本研究でのアプローチを用いることで、地域特性を明示的に考慮した地域間での（耐震化に係わる）予算資源の配分についても考えることができる。

5. 結言

本研究では、水道と応急給水を組み合わせた災害時での水供給サービスを対象とし、各々の手段の整備範囲の決定方法について検討した。これにより、耐震化の対象となる地域の属性及び利用者属性を考慮して耐震化の範囲を決定することができるようになり、水道の耐震化をどこまで整備するかという防災対策上の課題に対して本研究での方法が一つの有用な道具になると考えられる。本研究では、応急給水によるサービスを所与として検討したが、耐震水道と応急給水によるサービスを担保する施設（例えば緊急輸送道路など）の双方の整備範囲を決定する方法に拡張することもできる。さらに、ここで提案した方法は、災害時の水供給サービスのみならず、利用者にとって複数サービス供給手段が利用可能であるような生活基盤サービスについても応用可能であると考えられる。

本研究では定式化等において多くの仮定を設定して検討を行っておりこれらの一般化等が今後の課題となる。また、上の検討ではパラメータの値を仮想的に設定して数値分析を行ったが、実際に行われている水道の耐震化整備を基に設定したパラメータを用いてここで提案した方法の有効性を確認する必要がある。

付録

被災率と耐震化範囲に関する補足的考察

本編では $\lambda = 0, \mu = \infty$ として耐震化範囲の決定について検討したが、ここでは耐震化されていない水

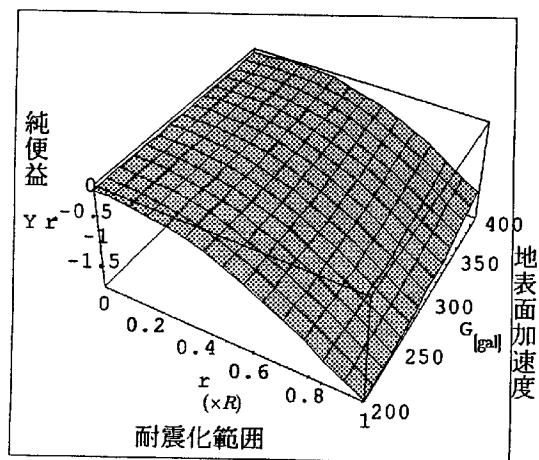


Fig.9 Optimal extent of upgrading waterworks for ground surface acceleration[gal]

道管について求められている被災率 μ と地震加速度との関係を踏まえて、被災率 λ と耐震化範囲 r^* の関係について検討する。

μ は東京区部における地震災害の推定に関する報告書（東京都防災会議，1978）の被災率の式を磯山ら（磯山・片山，1982）が改良した次式を用いる。

$$\mu = 1.7 \times G^{6.1} \times 10^{-16} \quad (59)$$

ここに G は地表面加速度[gal]である。次に本編の4.2(2)と同様に各パラメータを設定し、 μ を上式のように、 WTP を0.3として与え、 $200 \leq G \leq 400$ の範囲について耐震化範囲を検討する。 $\lambda = 1 \times 10^{-20}$ とした場合についての結果をFig.9に表す。Fig.9は、地表面加速度 G [gal]の地震の発生が予測される地域を想定し、その地域に被災率 λ の耐震水道を敷設する場合の純便益が最大となる耐震化範囲を表している。Fig.10はFig.9を等高線で表した図で、純便益 $Y(r^*)$ が高いところほど白色、低くなるにつれて黒色で表されている。点線は、最大の純便益を達成する r^* の軌跡を示している。

これら3つの図より地表面加速度 (G [gal]) が大きな地域ほど耐震化されていない水道管の被災率 μ が大きくなり、これに伴って耐震化範囲も広がることが分かる。これは、耐震化することによって水道からの水の入手可能な利用者数が増加するためである。一方で、地表面加速度が小さい地域では耐震化範囲が0となることが分かる。

このように、ある地表面加速度が予測される地域毎に、耐震化範囲を導出しうることが明らかになった。

謝辞

本稿の作成にあたっては、京都大学防災研究所の

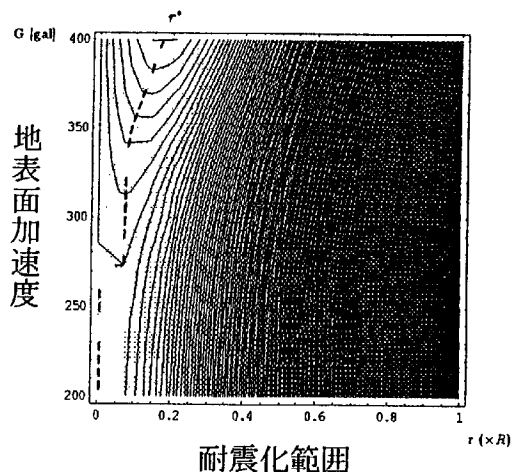


Fig.10 Optimal extent of upgrading waterworks for ground surface acceleration[gal](contour line)

岡田憲夫教授，多々納裕一助教授の助言を受けた。ここに記して表す。

参考文献

- 1) 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,土木学会論文報告集,第321号,1982.
- 2) 奥村誠,吉田英雄: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.
- 3) 亀田弘行,能島暢呂:阪神・淡路大震災における生活支援のアンケート分析,地域安全学会論文報告集, pp.338-343, 1997.
- 4) 塩野計司,中林一樹,高野公男:震災時生活支障の予測マップ,地域安全学会論文報告集, pp.387-395, 1995.
- 5) 東京都防災会議:東京区部における地震被害の推定に関する報告書, 1978.
- 6) 日本水道協会,水道施設耐震工法指針・解説, 1997.
- 7) 吉田英雄,奥村誠:事後の対応を考慮した緊急給水拠点配置計画の研究,土木学会中国支部第50回研究発表会, pp.449-450, 1998.

A Performance Based Planning of Water Supply Service System under Seismic Risk

Hideyuki KITA*, Keishi TANIMOTO*, and Toshihumi HANAI**

* Faculty of Engineering, Tottori University

** Shinnichi, Ltd., Japan

Synopsis

This study aims to develop a model to evaluate the performance level of water supply service at each location which is maintained by the optimal combination of supply means. We recognize the road network on which water supply points are designated as a local condition and the capability to carry water as an attribute of residents. As a result, a resultant extent to upgrade waterworks can be found by comparing the benefit and cost of their upgrading under the given local conditions including the expected remaining infrastructure and the residents.

Keywords : *Performance Level, Water Supply, Lifeline, Disaster Prevention*