

地震後の機能性能を考慮した 上水道管路の耐震補強に関する研究

宮島 昌克¹・伊藤 真美²・川畑 公義³・北浦 勝⁴

¹正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

²福井県土木部 (〒910-0005 福井市大手 3-17-1)

³学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程 1年 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

⁴フェロー 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

阪神・淡路大震災以降、地震後の機能性能に着目した耐震設計について検討されてきており、ライフラインについてもその例外ではない。本研究では、上水道管路に注目し、地震後に要求される機能性能について整理するために、水道事業者へ向けてアンケートを実施するとともに、機能性能の1つの評価指標として困窮度を定義し、機能性能を考慮した耐震補強法について考察し、金沢市の上水道システムにおけるケーススタディを行った。

Key Words: system performance, water supply system, earthquake

1. はじめに

現在の都市においてライフラインは生活に欠かすことのできないものとなっており、地震といった突如の危険事象においてもある程度の機能性能を保つことが望まれる。特に阪神・淡路大震災以降、地震後の機能性能に着目した耐震設計について検討されており、ライフラインについてもその例外ではない。

本研究では、上水道施設が地震後に有すべき機能性能について水道事業者を対象にアンケートを行い、各事業者が地震後の機能性能についてどのような考えを持っているかを把握する。つぎに、金沢市をケーススタディとして地震時被害予測を行った後、流量解析を行い、給水量の不足による住民の困窮度を定義し、地震後の機能性能を困窮度を用いて定量的に評価するとともに、機能性能向上のための耐震補強法について考察する。

2. アンケート調査について

全国90の水道事業体に調査票を郵送し、ファクシミリにて返送していただいた。返送数は63であった。調査内容は大別して各事業者の特徴、上水道施設の概要、震災に対する備え、水道施設の機能性能についての4つである。

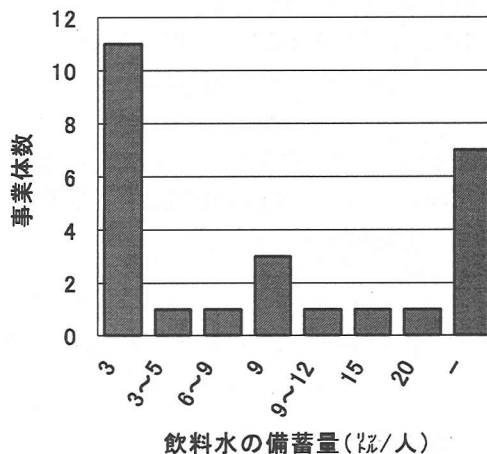


図-1 指導している飲料水の備蓄量

(1) 震災に対する備え

ここでは、震災に対する備え、特に住民への指導について述べる。「水の備えについて住民に指導していますか」という質問に対して、約4割の事業者が指導していると答えている。“いる”と答えた事業者のうち、どの程度の水量を指導しているかに関しては、図-1のような結果であった。最後の項目“-”は“具体的な値を決めていない”を示している。多くの事業者が1人当たり3リットルと答えている。地震直後の生命維持のための水を住民各自が備蓄するようという考えの現れである。

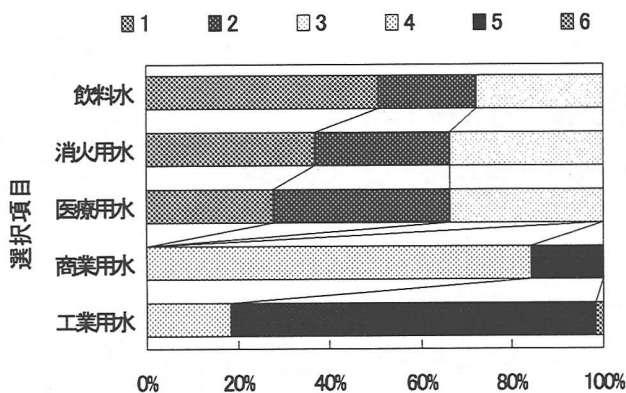
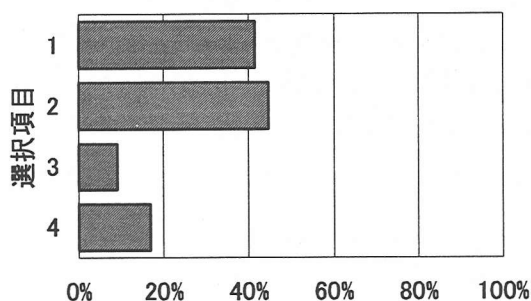


図-2 給水活動における優先される順位の割合



1. 目標性能を達成するために、施設の耐震化の他に応急給水などのソフト的対応も考えられるので、目標性能が耐震設計にストレートに結びつかない。
2. 目標性能を明示することによって、市民の理解が得やすくなり、耐震化事業が行いやすい。
3. 特に問題はない。
4. その他

図-3 水道施設の性能設計を行うにあたっての問題点

(2) 地震後の機能性能

給水活動における供給先の優先順位についての質問に対しては、図-2のような結果となった。これは、各選択項目について優先順位を1位から6位まで選んでいただき、選んだ順に足し合わせたものを小さい方から、すなわち優先順位の高いと考えられる順に番号をつけた。“飲料水”が最も優先されるべきであると考えていることがわかるが、順位付けはできないと考えている事業者が幾つかあり、一概に“飲料水”が最優先であるとはいえない。ただ、“消火用水”や“医療用水”については、他に水源（消火用水：河川、プールなどの消防水利、医療用水：各病院による備蓄など）があるため、優先順位がわずかに低くなったと考えられる。

また、目標性能を明示した上で、それを満たすように耐震設計を行うという性能規定型設計法を取り入れるにあたっての問題点についての質問に対し、図-3のような結果となった。性能設計に関しては、性能というソフト面と実際の管路の耐震化といったハード面をうまく結びつけることが困難であるため、目標性能から耐震化を行うことは難しいと考えていることがわかる。ただし、住民に対しては目標性能を明示し耐震化を行う方がより理解を得やすいと考えていることがわかる。

(3) まとめ

アンケート調査の目的として『上水道施設の地震後の機能性能とは何か?』が挙げられるが、この問い掛けに対して事業者側も“分からない”という声が多くあった。下に主な意見を挙げる。

- ・ハードとソフトをつなげて考えることは難しく、定義する事はできない。
- ・1人1日3リットルというのも、性能ではなく応急給水の単なる目標でしかない。
- ・耐震化を行おうと思っても、財政的な問題があり、今の対策で手一杯である。

今回のアンケート調査から、耐震化をハードとソフトの両面から考え、機能性能を満たすように耐震設計を行うことは、容易なことではないといえる。また、ハードの対策には莫大な資金が必要となり、仮に耐震化を行ったとしても、どの程度の効果を発揮するかがなかなか見えづらく、水道料金を払っている住民に耐震化について理解を得ることは難しい事である。

次節では、アンケート調査の結果を踏まえ、上水道施設の機能性能を定量的に表現し、耐震対策の効果を定量化するための手法を提案する。

3. 住民困窮度から見た耐震補強の評価手法

地震後の機能性能を保つために、管路の耐震管への布設替えなど様々な耐震対策が行われるが、それには莫大な資金が必要であり、限界がある。また、水道事業は需要者からの水道料金で賄われるものである。そこで、耐震対策の効果を定量化することで、住民の理解が得やすくなり、また、対策費用と効果の関係から最適な対策案の選択をすることができると思われる。

ここでは、上水道システムの機能性能を表す指標として住民の飲料水に注目して住民困窮度を定義し、対策案の実施前後の機能性能を比較することにより対策案の効果を評価する手法を提案する。

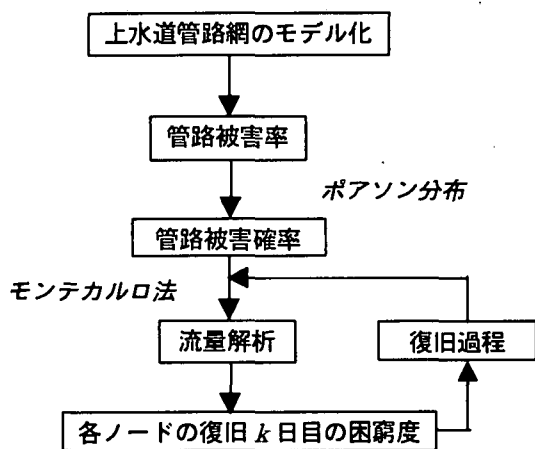


図-4 困窮度算出のフローチャート

(1) 困窮度の算出

住民困窮度とは地震による損失の1つとして、地震発生後に管路破壊によって不足する水量に係数を掛けることで、住民が困る状態を貨幣換算したものである。これを定義することで、地震発生後の上水道管路網の性能を評価できる。困窮度算出のフローチャートを図-4に示す。

(a) モンテカルロ法を用いた破壊シミュレーション及び流量解析

今回の解析における被害率は、阪神・淡路大震災のデータを分析し、算出された次式(1)を用いる¹⁾。

$$D = 1.698 \times 10^{-16} \times A^{6.06} \quad (1)$$

ここで、 D は被害率[件/km]、 A は地表面最大加速度[gal]である。

次に、地震による管路の破壊はポアソン分布に従うとし、管路被害率を算出した。また、破壊の程度を破壊箇所数によって、接点と接点を結ぶ管路が破壊を受けて、管路は連結しているが漏水が発生している状態、または、接点と接点を結ぶ管路が破壊を受け、通水不能になっている状態とする。

流量解析については、漏水の考慮が容易であるエネルギー位法を用いて解析を行った²⁾。

(b) 困窮度の定義

流量解析から求まる取り出し水量を供給される水量とし、地震時に要求される水量を必要水量とする。次式(2)により困窮度を定義する。

$$K_{i,k} = \{Q_{n_i}(k) - Q_{i,k}\} \times 24 \cdot 60 \cdot 60 \times C_w(k) \quad (2)$$

$K_{i,k}$: ノード i の復旧 k 日目の困窮度 (円)

$Q_{n_i}(k)$: ノード i の復旧 k 日目の単位必要水量 (m^3/sec)

$Q_{i,k}$: ノード i の復旧 k 日目の供給水量 (m^3/sec)

$C_w(k)$: 復旧 k 日目の単位水量損失 ($\text{円}/\text{m}^3$)

単位必要水量については、地震後日数が経つにつれて住民の要求する水量は増加するので、地震後の経過日数によって増加させている。本研究では、金沢市地域防災計画³⁾の給水計画より、必要水量を地震後3日目まで3ℓ/人・日、4日目から7日目まで20ℓ/人・日、8日目から14日目まで100ℓ/人・日、15日目から28日目まで300ℓ/人・日、29日目以降は通常必要水量と考えられる444ℓ/人・日としている。

また、単位水量損失とは、水が供給されなかったときの単位水量 (m^3) 当たりの水の貨幣価値である。ここでは、通常1人1日当たりの平均配水量と一般家庭の水道料金を基準として、必要水量に反比例するように単位水量損失を定める。

(2) 住民困窮度を用いた耐震補強案の評価

前節で定義した困窮度を用いて、耐震補強案の評価方法について述べる。

耐震補強案の評価を行う場合には、最も経済的で効果的な耐震補強案の選択、決定を行うことが必要である。本研究では、評価方法の1つとして費用便益分析を用いることとする。

まず、地震による損失は、困窮度 K の他に管路損傷の修理、復旧のための費用がある。これを構造損失 P と呼ぶ。ここで、構造損失と住民の心理状態を金額に換算した困窮度との間には隔たりがあると考えられるため、困窮度に重み c を掛け、足し合わせたものを地震による損失 R とし、次式(3)に示す。

$$R = P + cK \quad (3)$$

c : 構造損失に対する困窮度の重み

これを用いて、耐震対策前後の差から、対策案の効果とすることができる。すなわち、この効果を対策案に必要なコストで割ることで、コスト効果比を求め、評価基準 η_i とすることができる。これを次式(4)に示す。

$$\eta_i = \frac{B_i}{C_i} \quad (4)$$

C_i : 対策案 i を行うために必要なコスト

B_i : 対策前後の損失の差

4. 金沢市におけるケーススタディ

上述した手法を金沢市の上水道管路網に適用し、ケーススタディを行った。本研究で対象とした地

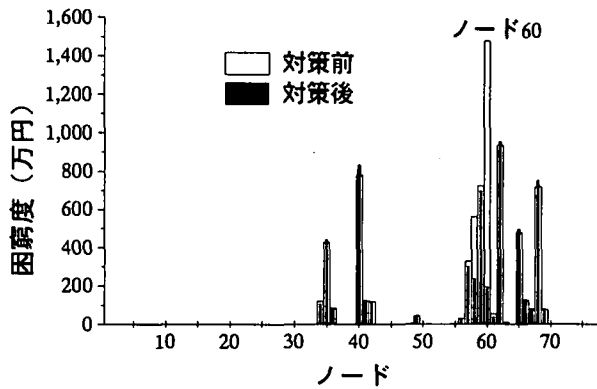


図-5 各ノードの住民困窮度

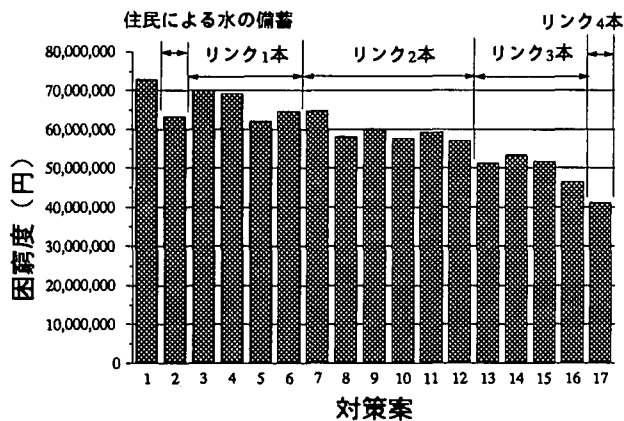


図-6 各対策案に対する全住民の困窮度

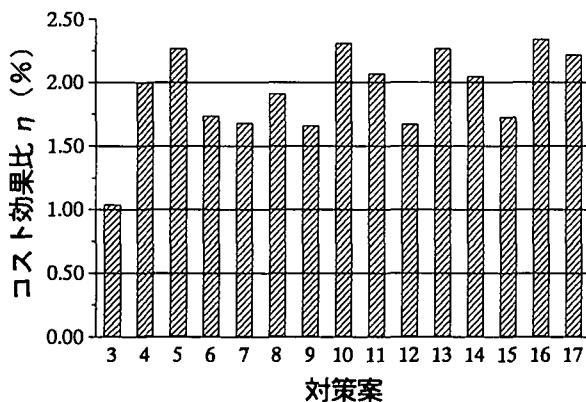


図-7 各対策案に対するコスト効果比

域は、金沢市の計画給水区域であり、対象管路は口径が 300mm 以上の上水道幹線配水本管である。モデル化した管路網は配水場 8 箇所、需要点 69 箇所、配水管路 107 本からなっている。また、対象とした想定地震は、金沢市を通過している活断層と推定される森本断層が活動した場合（マグニチュード 6.7）である。

ケーススタディを行った結果を図-5、図-6、図-7 に示す。対策としては、対象とする配水管を耐震継手のダクタイル鋳鉄管に布設替えを行うものとする。

図-5 については、一例としてノード 60 の上流

にあるリンク 83、85 に対して対策を施した場合の対策前後の各ノードの困窮度を示している。図-5 から、対策後にノード 60 の困窮度が激減していることが分かる。このように対策を行うことで、困窮度を減少させることができる。

また、図-6 については、いくつかの対策案を行ったことによる困窮度の変化を示したものである。対策案 1 は、無対策、対策案 2 は、予め住民による水の備蓄が 9 日/人あった場合であり、また対策案 3 から対策案 17 は、一例としてノード 60 上流周辺の 4 つのリンク 80、83、85、86 について、それらの組み合わせを変え、15 通りの対策をそれぞれ行ったものである。この図を見ると、リンクを 2 本布設替えするよりも 1 本しか布設替えしない場合の方が困窮度の減少が大きい場合もある。しかし、この低減量だけを見ても対策案を評価することはできない。対策案とそれに対するコストの関係が重要である。そこで、対策案 3 から対策案 17 についてコスト効果比を求めた結果が図-7 である。ただし、この場合のコスト効果比の算出において、損失には、管路損傷の修理、復旧費用などの構造損失を考慮していない。また、対策案 1 と対策案 2 はコストがかからないためコスト効果比を求めていない。図-7 より、コスト効果比の大きい対策案 16 が最適な対策であると 1 つの評価ができる。

5. おわりに

水道事業体に対するアンケート調査を実施し、機能性能に対するハードとソフトをつなげることの難しさを知ることができた。

機能性能を評価する指標として、困窮度を定義することで、住民が地震後に必要な水量を取り出せないことによる困る度合いを金額で表現することができた。また、困窮度は、耐震対策案を比較検討できる指標の 1 つであると考えられる。ただ、その評価方法については今後さらに検討していく必要がある。

謝辞：本研究が文部省科学研究費補助金基盤研究(C) (2) (No.11650480)の補助によって行われたことを記し、感謝します。

参考文献

- 1) (財) 水道技術研究センター分科会資料
- 2) 高桑哲男：配水管網の解析と設計，森北出版，1978.8.
- 3) 金沢市防災会議：金沢市地域防災計画「震災対策編」総論，1998.10.