

## (77) 液状化を考慮した上水道施設の地震時信頼度解析

—雪国金沢の場合—

金沢大学工学部 正員 ○北浦 勝  
金沢大学大学院 学生員 鈴木広士

### 1. はじめに

地震時における上水道施設の信頼性を評価するに当たっては、壊滅的な被害をもたらす恐れのある強い砂質地盤の液状化現象の影響を無視出来ない。特に、大都市のほとんどが沖積平野にあるわが国においては、強大な地震時には、液状化現象による上水道施設、中でも配水管の被害を避けられないのが現状である。そこで本研究では、上水道施設の信頼度解析に液状化現象の要因を取り込んだ手法を提案し、ケース・スタディとして金沢市上水道施設を対象に解析を行った。

ところで、雪国に位置する金沢市では、56豪雪をはじめとして数多くの雪による被害を受けている。そこで雪国という地域的特色を生かした地震対策を考えてみた。その一例として消雪井戸の利用がある。金沢市には、地下水を水源とした消雪装置が市内の幹線道路に埋設されている。この消雪装置に水を供給している消雪井戸を、震災時の飲料水として利用できる点に注目し、先の上水道施設の信頼度解析の解析結果との比較検討を行った。

### 2. 液状化の影響を考慮した管路の破壊確率の評価

(1) 管路の破壊確率の定義 本研究では、地震による管路の破損状態を次の2つのように定義し、モデル化を行った。(a)大破損；通水不能な状態を指し、管路に管体部の折損、継手部の抜けといった大破損が1ヶ所以上発生するか、または、管体部の亀裂、継手部のゆるみといった小破損がnヶ所以上発生した場合と仮定する。(b)小破損；漏水は発生するが通水可能な状態を指し、管路に小破損がnヶ所未満発生した場合と仮定する。なお、本研究ではnを一応10としている。管路の破壊がポアソン過程に従うものとする、大、小破損の発生する確率（破壊確率）は次のようになる。

$$\Pr(B) = \{1 - \exp(-D_p \cdot L)\} + \exp(-D_p \cdot L) \left\{1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(D_q \cdot L)^k}{k!} \cdot \exp(-D_q \cdot L)\right\} \quad (1)$$

$$\Pr(S) = \exp(-D_p \cdot L) \cdot \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(D_q \cdot L)^k}{k!} \cdot \exp(-D_q \cdot L) \quad (2)$$

ここで、B、Sは大、小破損の発生する事象、Lは管路長(km)、 $D_p$ 、 $D_q$ は大、小破損の被害率(ヶ所/km)である。

(2) 管路の破壊に影響を及ぼす諸要因 管路の破壊は、液状化の有無、地盤条件、管種、地震の規模などさまざまな要因に左右される。松尾・堀内は、管の破壊に影響を及ぼす要因として、管種と地表面から深さ5m以内の平均N値をあげている。一方、新潟地震(1964年)では、地盤の液状化により水道管の約68%が被害を受けているといわれ、また、5月26日に発生した日本海中部地震においても液状化現象の発生が確認されている。以上のことから、地震による管路の破壊に影響を及ぼす要因として、管種、地表面から深さ5m以内の平均N値、液状化の程度、さらに震度を取り上げるのが妥当であると考えた。したがって、被害率Dは、

$$D = f(\text{液状化の程度, 地表面から深さ5m以内の平均N値, 管種, 震度}) \quad (3)$$

となる。

(3) 液状化の影響を考慮した被害率 文献<sup>(1)(2)</sup>をもとに若干の仮定を用いると、非液状化時の被害率を地表面から深さ5m以内の平均N値、管種、震度から求めることができる。そこで本研究では、次式に示すように液状化の程度を補正係数として被害率に取り入れることとする。

$$D = \delta \cdot f'(\text{地表面から深さ5m以内の平均N値, 管種, 震度}) \quad (4)$$

ここに、 $\delta$  は被害の液状化による増大を考慮する補正係数である。

液状化の程度を示す指標として地盤液状化指数 $R$ があるが、亀田・後藤<sup>3)</sup>は $R$ と液状化確率<sup>4)</sup>の関係を次式で近似している。

$$P(L/P_L=x) = \begin{cases} 1 - (x-15)^2 / 225 & (0 \leq x \leq 15) \\ 1 & (x > 15) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $L$  は液状化する事象である。そこで本研究では、液状化確率が式(5)で示されるように $P$ の2次関数となっている点に着目し、この特性を用いて補正係数 $\delta$ を定めた。すなわち、

$$\delta(P_L=x) = \begin{cases} a - (a-1)(x-15)^2 / 225 & (0 \leq x \leq 15) \\ a & (x > 15) \end{cases} \quad (6)$$

となる。ここで、 $a$  は液状化による被害の激しさを規定する倍率である。すなわち式(6)は、液状化する可能性のない $R=0$ のとき $\delta=1$ 、液状化する可能性の高い $R \geq 15$ のとき $\delta=a$ となり、倍率 $a$ を定めることにより補正係数 $\delta$ の値が一意的に決まる。式(6)を図示したのが図-1である。これによって、被害率、さらには管路の破壊確率が明らかになる。

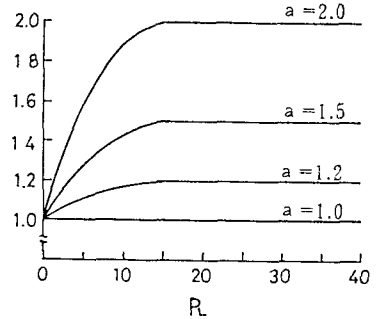


図-1 被害の液状化による増大を考慮する補正係数 $\delta$

### 3. 計算例

信頼度解析のケース・スタディとして金沢市上水道施設を取り上げ、その配水管路網を図-2に示した。金沢市では、犀川、大桑、館山、野田、石引、若松、四十万中区、四十万高区の各配水場から市内全域に水を供給しており、これを節点数69、管路数83から成るネットワークにモデル化した(図-3)。液状化の考慮として、 $R > 0$ かつ沖積層なる地域を液状化地域と定義し、これを図-4に示した。ここで、非液状化地域( $R=0$ または洪積層)では式(6)を用いるにあ

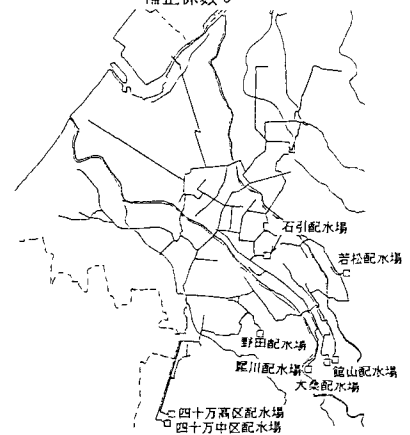


図-2 金沢市上水道配水管路網 (管径 300mm以上)

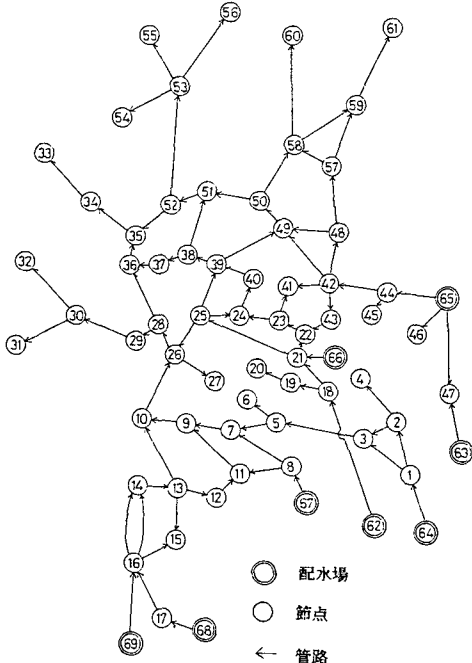


図-3 ネットワーク図

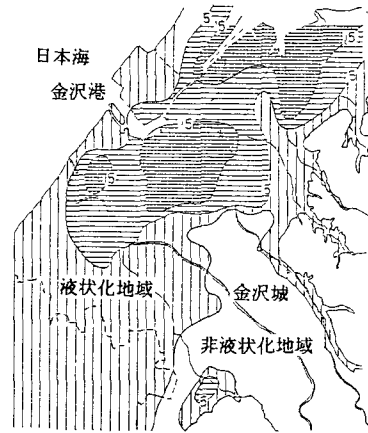


図-4 金沢市における液状化地域と地盤液状化指数分布

たり、すべて $R_i = 0$ とする。解析にはモンテカルロ法を用い、シミュレートされた管路の被害状況に応じて流量解析（エネルギー法）を行う。信頼性の評価として信頼度を次式のように定義する。

$$R_i = N_i / N \quad (7)$$

ここで、 $R_i$ は節点 $i$ における信頼度、 $N$ はシミュレーション回数、 $N_i$ は節点 $i$ において $3 \ell / \text{人日}$ に相当する水量が取り出せた回数である。 $3 \ell / \text{人日}$ は、震災後、消火、医療、飲用として最低必要な水量であると言われている。

式(6)における液状化の補正係数の倍率 $a$ を、 $a = 1$ （液状化の考慮なし）、 $a = 1.2$ （CASE I）、 $a = 1.5$ （CASE II）、 $a = 2$ （CASE III）の4ケースについて解析し、得られた結果を図-5(a), (b), (c), (d)に示す。ただし、震度 $V$ を想定し、シミュレーション回数は100回である。液状化を考慮しない場合には、配水場から最も遠く、しかも放射状に伸びた管路の末端部である日本海側の栗崎、木越、金沢港、金石、みどり地区の信頼度解析が低いのがわかる。次に、倍率 $a$ を増やす、すなわち液状化の程度を大きくしていくと、金沢城の北西部から日本海側にかけての液状化地域の中でも、前述の地区において信頼度の低下がみられた。したがって、液状化によって生ずる破壊に、最も敏感に機能低下をもたらすのは、液状化地域の中でもネットワーク形状の弱いところであるといえる。

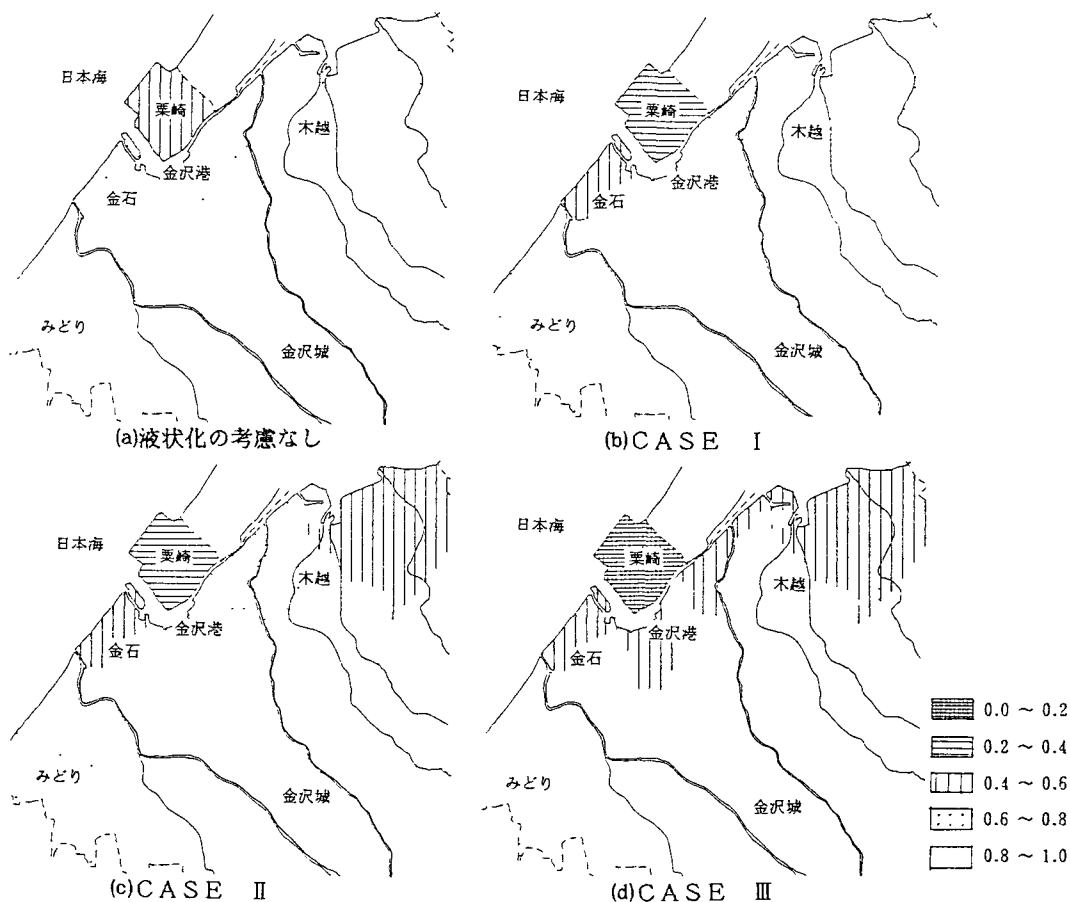


図-5 液状化の程度と信頼度の関係

#### 4. 震災時における消雪井戸を利用した応急給水

一般に、上水道施設に大きな被害を与える大・中被害地震が発生した場合、まず、地震被害による漏水を

最小限にくい止めるために給水を一次ストップし、被害程度を調べ、被害が地域的なものであれば計画給水を行い、もし全域的であれば、復旧作業と並行して幹線引き込みによる拠点給水、あるいは給水車による応急給水を行うことになる。これは、給水可能な地域でさえも被害程度の調査のために一時的に断水することが有り得ることを意味している。したがって、信頼度解析において信頼度の高い地域でも、地震後最低必要な量である3ℓ/人日の水量を得られないばかりでなく、消火用水すら確保できないことになる。このような地震直後の「空白」の時間を補うために、また、応急給水として、雪国であるという金沢市の地域的特色を生かした消雪井戸の利用を提案する。一般に、地震時における井戸の破壊確率は、上水道施設の破壊確率よりはるかに小さいものと考えられるので、この使用を考える。

消雪井戸とは、積雪時の道路交通を確保するために道路に埋設されている消雪装置の水源である。金沢市には現在120ヶ所(昭和54年調査)あり、そのうち水質検査を実施したものが31ヶ所で、20ヶ所が飲用に使えることが分かっている。そこですべての消雪井戸を飲用に適するもの、適さないもの、水質検査を行っていないものについて示したのが図-5である。図中の円は飲用に適する井戸を中心に半径500mの地域を示している。この距離は「もらい水」のために歩く距離のおよその限界である。したがって、図中の円の内側の地域は消雪井戸により飲料水を得られる地域と考えられ、この地域を消雪井戸給水地域と呼ぶこととする。

図-6によると消雪井戸給水地域は、金沢上水道施設を中心とした旧市街地をほぼ全域カバーしている。この地域は、信頼度解析において日本海側で信頼度の高い地域でもあるので、地震時においてはほぼ確実に消火用水や飲料水を得ることができる。また、飲用に適さない、あるいは、水質検査を行っていない消雪井戸も消雪井戸給水地域に集中しており、これを消火用水、飲用以外の生活水として利用することも可能であるから、消雪井戸給水地域において給水車による応急給水を行う必要はなくなる。一方、消雪井戸給水地域以外の地域を考えるに当り、比較的信頼度の高い消雪井戸給水地域の周辺地域と、著しく信頼度の低い日本海側の粟崎、木越、金沢港、金石、みどり地区との2つに分類する。前者は、消雪井戸による応急給水に頼ることはできないが、信頼度が高いという点から上水道による給水の高い地域である。仮に、管路が破壊して断水になったとしても、復旧作業を集中的に行うことにより、比較的早期に復旧する見込があると思われる。後者は、液状化の影響により信頼度の低い地域であり、かつ、消雪井戸のない地域である。この地域は配水場から最も遠く、これに通じる管路が液状化によって全面的に破壊を受ける恐れがあるので早期の復旧は期待できそうにない。したがって、この地域では給水車による応急給水活動に重点を置いていくべきであると思われる。

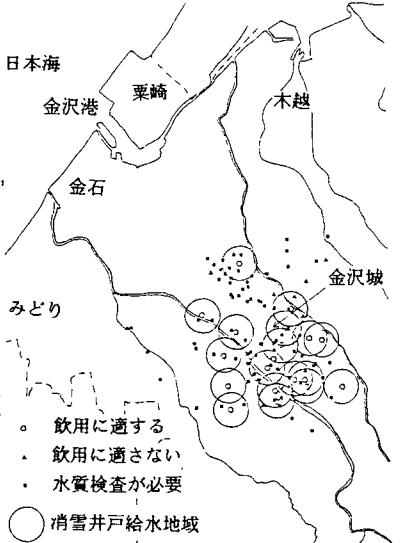


図-6 金沢市における消雪井戸と消雪井戸給水地域

以上のことをまとめると、消雪井戸を利用した上水道施設の地震直後の水供給対策は次のようになる。(1)消雪井戸給水地域では、消雪井戸を実際に使用できるような状態にしておくことにより、ほぼ安全である。(2)消雪井戸給水地域の周辺地域では、管路の復旧作業を中心に行う。(3)粟崎、木越、金沢港、金石、みどりなどの液状化危険度の高い地区では、復旧作業と並行して給水車による給水活動を強化する。

参考文献 (1)松尾稔・堀内孝英：地震時における小口径埋設管の破壊に関する要因分析，水道協会雑誌，No.573，pp.12～22，1982年6月。(2)土岐憲三：上水道施設の震害予測に関する調査，大阪防災会議地震専門部会，1979年3月。(3)龍岡文夫：地震時における地盤の液状化の激しさの程度の予測，生産研究，32巻，1号，pp.2～10，1980年1月。(4)亀田弘行・後藤尚男：水道管路網の震害予測と地震信頼度解析，第19回自然災害科学総合シンポジウム，pp.187～190，1982年11月。(5)高桑哲男：配水管路網の解析と設計，森北出版(株)，1978年。(6)松井三郎・宮島昌克：金沢市における震災時の飲料水と消雪用水の供給方法についての提案，防災研究シリーズ，金沢大学工学部建設工学科防災研究グループ，1980年5月。