

金沢大学大学院 学生員 鈴木 広士
金沢大学工学部 正員 北浦 勝

1. はじめに

近年、都市への人口集中に伴い、都市機能の維持に欠かせないライフライン系（上水道、電気、ガスなど）の地震対策が叫ばれている。中でも、上水道施設は、地震時には消火、医療水、飲料水といったいわゆる都市の生命線として重要な役割を果たしている。上水道施設の耐震化は、都市防災的観点から最重要課題といえることができる。従来、上水道施設の耐震性を考える場合には、モンテカルロ法を用いてその信頼性を評価する手法（信頼度解析）が用いられてきた。本研究は、上水道施設の被害の中でも、特に液状化による被害が多いことに着目し、液状化の影響を考慮した信頼度解析をモンテカルロ法を用いて行なった。

2. 液状化の影響を考慮した管路の破壊確率

本研究では、管路の破壊状態を大破壊と小破壊とに分類し、モデル化を行なった。大破壊とは通水不能状態を指し、管路に継手部の抜け、管体部の折損といった大破壊が1ヶ所以上発生する場合、または、継手部のゆるみ、管体部の亀裂といった小破壊が m ヶ所以上発生した場合とする。一方、小破壊は漏水があるものの通水可能な状態を指し、管路に小破壊が m ヶ所未満発生した場合とする。なお、本研究では m 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、小破壊の発生する確率（破壊確率）は次式のようになる。

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

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

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

被害率 D は、地盤条件、管種、地震の規模、液状化の有無などさまざまな条件に左右される。松尾・堀内¹⁾は、管の破壊に影響を及ぼす要因として、管種と地表面からの深さ5m以内の平均 N 値をあげている。一方、新潟地震では、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ている。以上のことから、地震による管の破壊に影響を及ぼす要因として、管種、地表面からの深さ5m以内の平均 N 値、液状化の程度、さらに、震度を取り上げ、被害率 D を評価した。したがって、被害率 D は、

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

となる。文献をもとに若干の仮定を用いると、非液状化時の被害率を平均 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にする。

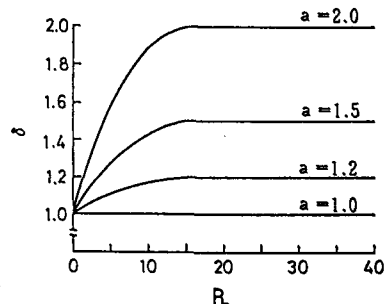
$$D = \delta \cdot f(\text{地表面からの深さ5m以内の平均}N\text{値, 管種, 震度}) \quad (4)$$

ここに、 δ は被害の液状化による増大を考慮する補正係数、 f は平均 N 値、管種、震度によって決まる被害率である。

液状化の程度を示す指標として地盤液状化指数 R ²⁾があるが、亀田・後藤³⁾は R と液状化確率の関係を次式で近似している。

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

ここで、 L は液状化する事象である。そこで、本研究では、液状化確率を式(5)で示されるように R の2次関数となっていることを考慮し、 δ を次式のように定めた。



図一 被害の液状化による増大を考慮する補正係数 δ

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

ここで、 α 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、 $R=0$ のとき $\delta=1$ 、 $R \geq 15$ のとき $\delta=\alpha$ となり、 α を定めることにより δ の値が一意的に定まる。式(6)を図示したのが、図-1である。

3. 計算例

ケース・スタディとして金沢市上水道施設を取り上げ、その水道管路網を管路数83、節点数(供給基地を含む)69、供給基地数8から成るネットワークにモデル化した。図-2は、ネットワーク図に R 分布及び非液状化地域($R=0$ または洪積層)を示したものである。本解析では、モンテカルロ法を用いて地震による管路の被害状況をシミュレートし、それぞれの場合についてエネルギー法を用いて流量解析を行なう。信頼性の評価として、信頼度を次式のように定めた。

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

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総数、 N_i' は節点 i において3ℓ/人/日に相当する水量が取り出せにシミュレーション回数である。3ℓ/人/日は、震災後、消火用、医療用、飲料用として最低必要な水量である⁴⁾。

式(5)における液状化の補正係数の倍率 α を、 $\alpha=2$ (Case I)、 $\alpha=1.5$ (Case II)、 $\alpha=1.2$ (Case III)、 $\alpha=1$ (液状化の考慮なし)の4ケースについて解析し、得られた結果を図-3に示す。ただし

シミュレーション回数は100回である。 α を1から順次増やしていくにつれて信頼度が低下する節点と、そうではない節点がある。信頼度が低下している節点は、31、33、55、56、60、61であるが、図-2を参照するとすべての節点は $R \geq 5$ の地域にある。しかも、これらの節点は、放射状に伸びた管路の末端節点である。したがって、液状化を考慮することにより、液状化の可能性のある地域(液状化地域)の中でも、特にネットワーク形状の弱い節点の信頼度が低下することになる。

今回は倍率 α をパラメータとして解析したが、今後、震害記録をもとに α を決定する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 松尾純・堀内孝英：地震時における小口径埋設管路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：上水道管路の震害予測に関する調査，大阪市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を程度の予測，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。

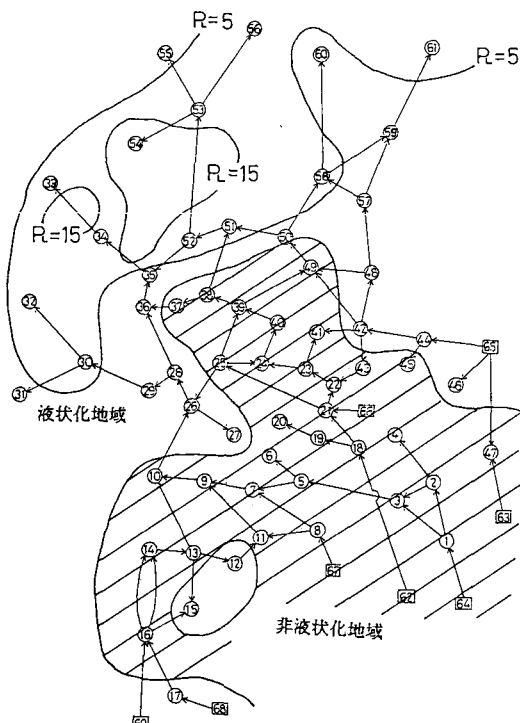


図-2 ネットワーク図における地盤液状化指数分布

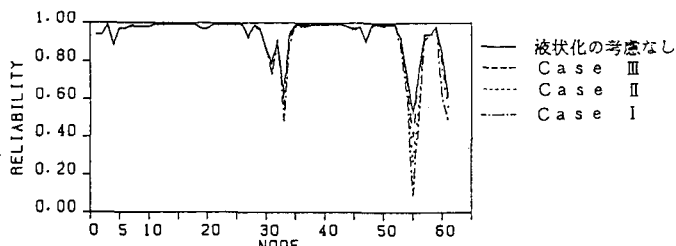


図-3 液状化の程度と信頼度の関係