

神戸大学工学部

学生員 ○岡本 祐

神戸大学工学研究科

正会員 鋤田 泰子

1. 研究の背景と目的

我が国における水道管路網の地震対策は、水道事業ガイドラインにおける業務指標 (PI) に代表されるように埋設されている耐震管路の比率で評価され、物理的な強度が重視されている。その原因として、ネットワークの強度は構造物の物理的な強度と全体の形状による位相的な強度の二つに分かれるが、現在の地震対策の評価において、精度よく簡便に利用できる位相的なシステム強度の評価指標がないことが考えられる。現在の耐震化率の指標と合わせてネットワーク特性が考慮できる指標を適用できれば、より効率的な耐震化を行うことができる。そこで、本稿では位相的なシステム強度評価が可能なトポロジカルインデックスを用いて水道系に適した新たなシステム強度指標を提案し、実管路網への適用性について明らかにする。

2. トポロジカルインデックスを援用したシステム強度指標の提案

トポロジカルインデックス¹⁾ (Topological Index, 以下 TI) は分子化学の分野において異性体を分類する指標として提案され、グラフ G において隣り合わないリンクを k 個選ぶときの組合せの数として下式で表わされる。

$$TI(G) = \sum_{k=0}^m P(G, k) \quad (1)$$

ノード数が増えれば TI は増加し、ノード数が同じでも位相の違いにより TI が大きくなるにつれて分子のつながりが強くなり、沸点上昇など物理的な特性にも表れてくる。 TI の基本的な特性を応用させることで他のネットワーク特性指標として利用することができる。しかし、本研究で対象とする地震環境下の水道管路網では水源との連結性を考慮できることが望ましく TI のみでは扱えない。そこで、本研究で提案する指標はグラフ G におけるあるリンクが切断された場合に、水源ノードと連結している残余グラフの TI と、元のグラフ G の TI との比を用いて TI 損失率として評価する。さらに、 TI 損失率を用いてグラフ全体の強度を表わす指標を以下に示す。

(1) TI 損失率 (Loss rate of Topological Index, LTI) : グラフ G におけるリンク l が損傷したときの、リンク l がグラフに与える位相的な弱化の度合いを示す。

$$LTI(l) = 1 - \frac{RTI(l)}{TI(G)} \quad (2)$$

ここに、 $RTI(l)$: あるリンク l が損傷したときの残余 TI , $TI(G)$: グラフ G の TI

(2) 平均 TI 損失率 (Mean loss rate of Topological Index, $MLTI$) : LTI の平均で表わされるシステム全体の強度である。リンク総数 L に対して、形状の強度を評価する。

$$MLTI = \frac{1}{L} \sum LTI(l) \quad (3)$$

(3) 期待損失率 (Expected loss rate of Topological Index, $ELTI$) : リンクの損傷確率を $p(l)$ とした場合に、地震で一カ所のリンクが損傷するときのグラフ損失率の期待値を示す。

$$ELTI = \frac{1}{L} \sum p(l) \cdot LTI(l) \quad (4)$$

3. 実水道管路網への適用と耐震化への効果

指標を適用する水道管路網は 2007 年能登半島沖地震で被災した石川県輪島市門前町の水道とした。門前町の水道システムの他にノード数を同じとする二つのグラフを考慮した。一つ目は、水源から十字に分岐する、より集中した十字路グラフである。二つ目は、ノードが最も分散し地震災害時に孤立する顧客数が多い直線グラフとする。図 1 に各グラフを示す。直線グラフも十字路グラフも実際の水道システムでは存在しない分散と集中の限界モデルといえ、実際の水道システムはそれらのグラフ特性の間に位置すると考えられる。MLTI を表 1 に示す。一般の水道システム強度、MLTI は概ね 0.4 から 1.0 の間に含まれる。ノード数を減らした場合においても MLTI はそれほど変動しない。また、グラフごとの LTI(l)の分布を図 2 に示す。十字路グラフは LTI(l)が低い範囲に多く分布し、直線グラフは高い範囲に分布している。門前町はその中間に分布し、グラフ特性を反映している。

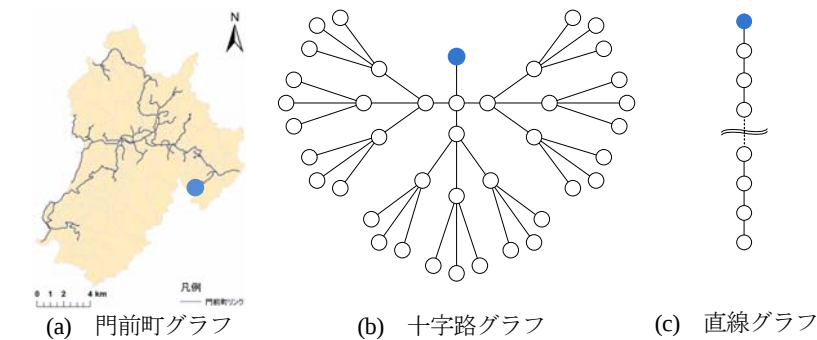


図 1 比較するグラフの概要 (●は水源ノード)

MLTI はリンク長の重みを考慮していないが、リンク長によってリンクの損傷確率は増加するため、地震時の水道システム強度を推定する上で非常に重要である。計測震度 6.0 を想定してリンクの損傷確率を計算し、耐震化方法によるシステム強度の向上効果を示す。表 2 に示す通り、5%の管路の更新方法を変えた 4 つの CASE について評価を行った。結果、CASE3、CASE4 の ELTI が大きく減少した。同じ 5%の管路を耐震化する場合でも、適切に耐震化を行わなければ更新延長に見合う減少効果が得られない。ELTI は適切な耐震化を行う上で有効な指標と言える。

4. 結論と今後の課題

実水道管路網を用いたデータを構築し、TI の適用性を確認した。また、新たに提案した指標、LTI 及び MLTI を用いてネットワークの位相的な特性について評価を行い、一般の水道システムの強度範囲を明らかにした。リンクの損傷確率を踏まえ LTI を拡張した指標、ELTI を提案し、効率的な耐震化に対する有効性を示した。今後の課題として、プログラムの改良により複雑な形状をもつ都市域の水道システムに対する強度評価、及び都市同士の水道システムの強度の比較することが挙げられる。

参考文献

1) Hosoya, H.: Topological Index. A newly Proposed Quantity Characterizing the Topological Nature of Structural Isomers of Saturated Hydrocarbons, Bull. Chem. Soc. Jpn, Vol.44, pp.2332-2339, 1971.

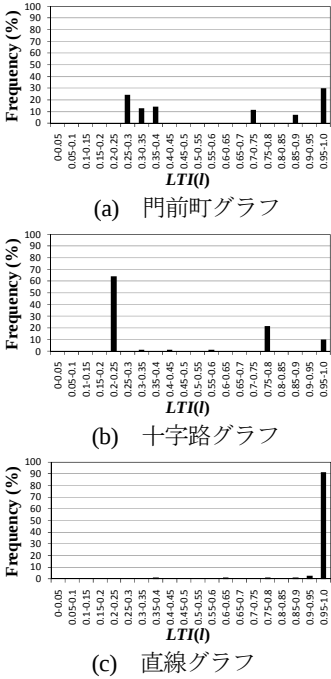


図 2 LTI(l)分布の比較

表 1 各グラフの TI(G), MLTI

グラフ	TI(G)	MLTI
(a) 門前町グラフ	3.210×10^{13}	0.607
(b) 十字路グラフ	9.740×10^{11}	0.427
(c) 直線グラフ	8.060×10^{14}	0.977

表 2 管路全体の 5%を耐震管に更新した場合の ELTI と減少比率

CASE	更新方法	ELTI	減少比率 (%)
CASE1	現状のまま	0.332	-
CASE2	延長が長いリンクから順に更新	0.320	3.6
CASE3	延長が短いリンクから順に更新	0.289	13.0
CASE4	LRTI(l)が高いリンクから順に更新	0.302	9.0