トポロジカルインデックスを用いた地震動レベルにおける水道管路系強度特性

神戸大学大学院工学研究科 学生員 〇岡本 祐 神戸大学大学院工学研究科 正会員 鍬田 泰子

1. 本研究の背景と目的

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する. さらに、地震動レベルにおける実管路網のシステム強度特性に対する分析を試みる.

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 T) 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.

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

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

ここに, *RTI(l)*: あるリンク1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.

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

(3) 地震時 *TI* 損失率(Seismic loss rate of Topological Index, *STI*):計測震度 *I* の地震動に対して複数のリンクが損傷したと きの,地震動がグラフに与える位相的な弱化の度合いを示す.

$$STI(I) = 1 - \frac{RTI(G, l \mid I)}{TI(G)}$$
(4)
ここに, RTI(G, l \mid I):計測震度Iの地震動に対して複数のリンクが損傷したときの残余 TI

キーワード:水道管路網、計測震度、トポロジカルインデックス

連絡先:兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1,078-803-6047,kuwata@kobe-u.ac.jp

3. 実水道管路網への適用

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も MLTI はそれほど変動しない.また,グラフご との LTI(I)の分布を図2に示す.十字路グラフは LTI(I)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.



4. 地震動下におけるシステム強度評価

門前町の水道管路網の計測震度ごとの STI(I)を算出するために,計測震度 から最大速度,最大速度から管路被害件数を既往の経験式から求めた.損傷 組み合わせはリンク長で重みを持たせたうえで,計測震度 I の地震動に対し て複数のリンクが損傷したときの STI(I)を求めた.計測震度 0.1 ごとに 1,000 回試行し, STI(I)の平均と標準偏差を求めた.解析結果を図 3 に示す.計測 震度が 5.0 を超えると STI(I)は 1.0 に収束する.管路被害が 5 箇所以上出ると

管路網の強度はほとんど失うことが示された. 能登半島沖地震において門前





計測震度 図 3 STI(I)とその平均及び標準偏差

町では波形は残されていないものの最大計測震度 6.4 が報告され,門前町の全戸において断水が確認されている²⁾.計 測震度が 5.0 前後の場合においては検討が必要であるが,計測震度が 6.0 の場合の *STI(I*)は 1.0 に収束しており, *STI(I*) の数値は過去の地震被害と整合する.

5. 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(I)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.さらに,実 際の地震動に対する被害と STI(I)の整合性を明らかにした.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することで,他の計測震度における地震被害と STI(I)の整合性を評価する ことが挙げられる.

参考文献

- 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.
- 2) 鍬田泰子,高田至郎,上野淳一,高士直哉:水道管路の地震被害に関わる要因分析,建設工学研究所論文報告集 49 号, pp.141-152, 2007.11