トポロジカルインデックスによる 水道システム統合の位相強度への影響評価

岡本 祐1·鍬田 泰子2

¹神戸大学大学院工学研究科(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1) E-mail:111t113t@stu.kobe-u.ac.jp ²神戸大学大学院工学研究科准教授(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1) E-mail:kuwata@ kobe-u.ac.jp

市町村合併に伴い水道システムも統合させる動きがあるが、元々は独立していた水道システム同士を統 合し水源を一元化することは、システムの冗長性が極端に低い箇所をシステムの中に創出する可能性があ り、形状の強度を評価できる指標が求められている.本研究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た.さらに、本指標の 適用性を確認するとともに、水道システムの統合を経験した管路網に対して水道システムの強度特性を地 震動レベルごとに分析し、統合によってシステムの位相的な強度は必ずしも向上するとは限らないことを 示した.

Key Words : topological index, water pipeline network, system strength, system integration

1. はじめに

地震時の断水被害を軽減するためには、水道シス テムの地震安全性を把握することが重要である.シ ステムの安全性を評価する方法は大きく二つに分け ることができる.一つは水道システムの構成要素と なる構造物の耐震性を評価する方法であり、もう一 つは水道システムの形状に基づいたシステムの強度 を評価する方法である.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)¹⁾に代表されるように敷設されている管 路に対する耐震管路の比率で評価され、物理的な強 度のみが重視されている. その原因の一つとして, 精度よく簡便にシステムの強度特性を評価できる指 標がなく、耐震管路の敷設延長という統計的に扱い やすい指標が汎用されている.事業成果を耐震化だ けで評価しても、耐震管の敷設箇所によってシステ ム全体の強度は異なり, 耐震化率だけでは説明でき ない. とくに, 近年全国で市町村合併が盛んに行わ れ、個々の独立した小規模水道システムを統合させ ようとする動きもある²⁾. 元々独立した水道システ ムを統合し水源を一元化することは、日常時の経営 面では最適解であるかもしれないが、災害時にはシ ステムの冗長性が極端に低い箇所をシステムの中に 創出してしまう可能性がある.こうしたことから,

構造物の強度だけでは評価することのできないシス テムの形状強度を評価できる指標が求められている.

水道管路網やその他のライフラインシステムの強 度評価指標についてはこれまで様々な研究がなされ ている. 例えば、ライフラインネットワークの機能 評価指標として Dueñas-Osorio et al.³⁾によって提案 されている Connectivity Loss (連結性損失,以下 C_{l})が挙げられる.これは起点ノードから総終点ノ ードまでの連結程度を示したものである. Chang and Nojima⁴⁾は、ネットワーク上のリンク切断によ って、連結性が無くなったノード間の供給量によっ てシステムの影響度を評価することを示している. さらに、星谷・山本 5はライフライン系やトラス構 造物などの工学システムは,多くの要素から構成さ れており,構成要素の部分的な被害がシステム全体 の破壊に直結するとは限らないとして、このような システムの有する保有耐力,いわゆる冗長性を情報 エントロピーを用いて物理的に定義し、冗長性指数 (Redundancy index)を提案している.

既往の研究では *C_L*や情報エントロピーが用いられていたが、本研究ではシステムの位相的な強度評価が可能なトポロジカルインデックス(Topological Index, *TI*)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.トポロジカルインデックスとは元々分子化学の知見であり、異性体の構造の違

表-1 TIと沸点の関係⁶

37	0 1 (0)	$p(\mathbf{G},k)^{\mathbf{s}}$)	7	L (ocub
N	Graph (G)	$\hat{k}=0$	1	2	3	Za	op(~C) ⁰⁾
1	•	1	0	0	0	1	-161.7
2	<u> </u>	1	1	0	0	2	-88.6
3		1	2	0	0	3	-42.2
4	_!_	1	3	0	0	4	-11.7
		1	3	1	0	5	-0.5
5	- -	1	4	0	0	5	9.5
		1	4	2	0	7	27.9
		1	4	3	0	8	36.1
6		1	5	3	0	9	49.7
	_ _ _	1	5	4	0	10	57.9
	_!	1	5	5	0	11	60.2
	!	1	5	5	1	12	63.5
		1	5	6	1	13	68.7

注) N: / - ド数, P(G, k): グラフ G において隣り合わない $リンクを k 個選ぶときの組合せの数, <math>Z_G: TI(G)$, bp: 沸点.

いが物性的な違いにどのように関連付けられるか評価した指標であるが、原子の分散・集中特性を表すために様々なシステム評価には汎用性の高い指標といえる.本研究では、提案するシステム強度指標の適用性について確認するとともに、水道システムの統合を経験した実管路網に対して、現在と統合以前の水道システムの強度特性を地震動レベルごとに分析を試み、水道システム統合がシステムの位相強度に与える影響を明らかにする.

2. トポロジカルインデックスの特徴

(1) トポロジカルインデックスの定義

トポロジカルインデックス, 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 Hosoya⁶⁰ によって定義されたものである. 具体的には, 分子 のトポロジカルなつながりを位相構造として捉える ことにより, 異性体の構造の違いが沸点, エントロ ピー, 生成熱などの物性的な特性の違いにどのよう に関連付けられるかを示す指標として TI は提案さ れた. **表**-1 は Hosoya によって示された異性体の TI (表中の Z_G) と沸点を比較したものである. ノー ド数, リンク数が同じでもシステムが分散し TI が 大きくなるにつれて, 沸点が上昇し, 分子のつなが りが強くなることを示している. 理論的には TI は グラフ理論を用いて説明され, 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 P(G, k) の合計として式(1)で表わされる.

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

図-1 TI(G)=5のグラフ

m はリンクの選択数であるため、グラフ G のノ ード数が偶数で n の場合、m=n/2、奇数の場合は m=n/2+1 となる.また、前提条件として P(G, 0)=1、 P(G,1)=l (リンク数) とする.

図-1 に示す単純なグラフを用いて,具体的に TI の算出方法を説明する.ノード数は4つで偶数であ るためリンクの選択数 m は 2 となる.前提条件の P(G, k)の値は P(G, 0)=1, P(G,1)=3 であり,隣り合 わないリンクを2つ選ぶ場合の組み合わせはリンク 1 とリンク 3 の一組みだけであるので,P(G,2)=1 と なる.組み合わせ P(G, k)の和が TI(G)であるので, このグラフは TI(G) = 5 と算出できる.基本的には ノード数が増えれば TI は増加し,リンクがあるノ ードに集中して連結している場合は隣り合わないリ ンクは減るために TI は小さくなる.

(2) *II* の定理

Hosoya はグラフ理論に基づいて種々の TI の定理 を示している.本研究では後述で樹系状の水道シス テムの強度評価を行うために,利用しやすい定理を 紹介する.この他にノードがループ状に連結されて いるグラフも TI で評価できることが示されている. a) 定理1

グラフが直列の場合、ノードが1、2、3、4、5、 6…と増えるごとにTTは1、2、3、5、8、13…と 増加していく.この数列は n 項目が n-1 項目と n-2 項目の足し合わせになる、隣接三項間漸化式となる. この漸化式の一般項はフィボナッチ数列によって式 (2)で示される.nにノード数を代入すれば、ノード が n 個の直線のグラフのTIを容易に求められる.

$$TI(G) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} \right\}$$
(2)

b) 定理2

あるリンクをカットしてできる部分グラフの TI によって, グラフ全体の TI を求めることができる.

$$TI(G) = TI'(G) + TI''(G)$$
(3)

ここで、TI'(G): あるリンクをカットすることによって生まれる部分グラフ $G_1 \ge G_2$ の TI の積、TI''(G): あるリンクとその両端のノードにつながるリンクを全てカットしたときに生まれる部分グラフ G_1 , $G_2'...G_n$ 'の TIの積.

これらのグラフは**図-2** に例示する通りである. なお, 点線で示すリンクが *TI*'(*G*)においてカットす るリンク, 太線で示すリンクが *TI*''(*G*)においてカ ットするリンクである.



図-2 部分グラフと全体グラフとの TIの関係

これらの定理を用いることで、大規模なグラフの *II* を求める際にも任意のリンクでグラフを分割し、 部分グラフの *II* の積和で全体グラフの *II* を計算す ることが可能である.

(3) // を用いた既往の研究

 Π 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.岡田ら[¬]は道路網の地震時の安全性に関わる性能特性が道路網の集中・分散特性と関連付けられるとの仮定の下に、 Π の集中・分散性を用いた道路網のリダンダンシィ(冗長性)の評価指標の有効性を明らかにしている. Π は隣り合わないリンク数の組み合わせ数であり、リンクが増加するにつれて指数的に増加するため、リンク数が非常に多い異なる二つ以上のグラフの分散性について相対的に評価する目的で、 Π を基準化した指標が提案されている.これは隣り合わないリンクの組み合わせの最大と最小値を用いて相対的なシステム強度を示したものである.下式は、岡田らによる基準化トポロジカルインデックス $\delta(G)$ である.

$$\delta(G) = \frac{TI(G) - TI\min(n, l)}{TI\max(n, l) - TI\min(n, l)}$$
(4)

ここで、 $TI_{max}(n, l)$: ノード数 n、リンク数 l のグ ラフ中での TI の最大値、 $TI_{min}(n, l)$ ノード数 n、リ ンク数 lのグラフ中での TI の最小値、 $TI_{max}(n, l)$ は定 理 1 のフィボナッチ数列で表わされる直線の TI、 $TI_{min}(n, l)$ は 1+lで表わされる.

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

*Π*は無向グラフの強度評価指標として扱われる が、水道システムのように流れが存在するネットワ ークを評価する上で、グラフの方向性と始点・終点 の位置づけは非常に重要である.本研究では、リン クの多さでネットワークの強さが決定されるという 性質を踏まえ、あるリンクが切断された場合に断水 していない水源側の残余グラフの TI を用いて、リ ンクが切断されることによる全体のネットワークに 与える影響を TI 損失率(Loss rate of Topological Index, LTI)として評価する方法を提案する.

通常グラフ G は、ノードの集合 X とリンクの集 合 A で G = (X, A) と定義される. このグラフ G に対 して、あるリンク集合 A_e ($A_e \subseteq A$) を除いた場合 グラフ G は k_e 個のグラフに分割される. このとき、 始点 (水源) ノード x_0 を含む グラフを G_0 ($G_0 = (X_0, A_0), x_0 \in X_0$) とし、それ以外のグラフ を $G_{0,1}, ..., G_{0,ke}$ とする. ここで水源側の生き残った グラフ G_0 の $TI(G_0)$ を残余トポロジカルインデック ス(Residual Topological Index, *RTI*)とする.

グラフ *G* において一つのリンク *a* ($a \in A$, $a \notin A_0$)が損傷したとき、リンク *a* が全体のグラフ に与える位相的な弱化の度合いとして *TI* 損失率は 以下で表される.

$$LTI(a) = 1 - \frac{TI(G_0)}{TI(G)}$$
(5)

*LTI*が1に近づくほどリンク*a*はグラフ全体にシ ステム強度低下の影響を与えるリンクといえる.こ の*TI*損失率を用い、グラフ全体のシステム強度特 性として平均*TI*損失率 (Mean loss rate of Topological Index, *MLTI*)を以下で表す.

$$MLTI = \frac{1}{L} \sum_{A} LTI(a)$$
(6)

ここで, Lはリンク総数

さらに、計測震度 I の地震の揺れに対して複数の リンクが損傷したときの水源ノードを含む残余グラ フの $TI(G_0|I)$ が元のグラフに対する位相的な弱化の 度合いとして、地震時 TI 損失率(Seismic loss rate of Topological Index, STI)を以下に示す.

$$STI(I) = 1 - \frac{TI(G_0 \mid I)}{TI(G)}$$
(7)

前述した基準化 *TI*, δ と本研究で提案する式(5)から(7)に示した指標はいずれもシステム全体の強度を推定するための指標であるが、本研究で提案する 指標はシステムの位相だけではなくグラフ内の水源 ノードの位置にも左右される。例として、図-3のようなグラフを考える。水源となるノードが1の場 合と2の場合によって δ と *MLTI*を算出したものを **表**-2 に示す。 δ は水源ノードがいずれであろうと変 化しないが、*MLTI*はノード1が水源であった場合 には0.69、ノード2が水源であった場合には0.63 となり、ノード2の場合の*MLTI*は小さくなる。ノ

表-2 水源ノード位置による簡易グラフ のるとMLTI 水源ノード δ MLTI (1) 0.690 1 0.902 ⊠-3 簡易グラフと水源ノードの位置 2 0.902 0.633 Å 凡例 6 km 1.5 3 門前町リンク (a) 門前町グラフ (b) 十字路グラフ

図-4 比較するグラフの概要(●は水源ノード)

(c) 直線グラフ

ード2が水源ノードであった方が冗長性の高いシス テムと示すことができる. 各リンクが壊れたときの 孤立ノードの合計数がノード1は25,ノード2は 19 であることからも、連結性との相対関係も符合 する.本研究で提案する指標はこれまでの分散/集 中の位相特性だけでなく,水の供給性能を考慮した 強度指標として利用できる.

4. システム強度指標の実水道管路網への適用

(1) 石川県輪島市門前町の水道システムの概要

システム強度指標の適用例として石川県輪島市門 前町の水道システムを対象とする. 旧門前町は旧輪 島市と市町村合併して現在は輪島市となっているが, 水道システムは地原ダムを主水源として、八ヶ川沿 いや海岸沿いなど広域に配水管路が埋設された独立 したシステムになっている⁸⁾. また,元々3 つの区 域に水源と小規模システムが形成されていたが、地 原ダムの建設により、統合された水道システムであ る. 2007 年 3 月 25 日に発生した能登半島沖を震源 とする地震では、地震直後に 2,500 戸全戸が断水し、 断水解消までに2週間程度を要している. 断水が長 引いた原因は、管路被害個数が多かったこと、配水 池の破損により貯水能力を喪失した地域があったこ と、中山間地域での管路内の空気抜きに時間を要し たことなどがあげられる. 被害報告⁸⁾によると, 配 水管延長 167 km に対して 55 件の管路損傷が確認さ れており、管路被害率は 0.33 件/km とこの地震で被 災した水道事業体の中でも最も高い値を示している.

(2) 門前町の水道システムの強度評価

門前町における配水管の水道システムの強度評価 として TI を適用するため管路網のデータベースの 構築を ArcGIS (ESRI 社) を用いて行った、道路の 数値地図⁹⁾と門前町の水道管路網地図¹⁰⁾からネット ワークデータを作成した. リンクは分岐から分岐ま でを一続きを一リンクとした. これは TI の評価に おいて延長によるリンク付加よりも形状の特徴を強 調するためである.基本的に樹系モデルとし、水道 管路網全体のノード数は348、リンク数は347とな った.本研究ではシステムの概略的な特徴を知るた め、本管にあたるリンクについてのみ計算する. リ ンク延長が短くシステム全体の構造を変化させない 程度にリンクを割愛し、ノード数 72、リンク数 71 としたグラフを基本モデルとした.

さらに、門前町の水道システムの他に二つのグラ フを考慮した.一つは、水源のノードから徐々に十 字に分岐する、より集中した十字路グラフとし、も う一つは、最も分散し地震災害時に孤立するノード 数が多い直線グラフとする. 図-4 に門前全体の水 道システムと他の二グラフを示す. 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であり,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 ため、その中間にある門前町水道システムのグラフ 特性を評価することで本指標の適用性についても検 討できる. 十字路グラフ, 直線グラフのノード数お よびリンク数については、門前町水道システムのグ ラフと同じくノード数 72, リンク数 71 とする. 門 前町の水道システムが樹系であるため, 直線グラフ,



十字路グラフともに樹系のグラフとした.

門前町グラフ,十字路グラフ,直線グラフのリン クの LTI の頻度分布を図-5 に示す.門前町グラフ ではリンクの LTI が 0.2 から 1.0 の間に分散してお り,また,十字路グラフでは 0.2 から 0.25 の LTI を 持つリンクが多く占めることがわかる.これは,ネ ットワークの中で下位の枝に当たるリンクが多く, それらのリンクが除かれてもシステムの位相的な強 度にそれほど影響がないことを示している.直線グ ラフでは,0.95 から 1.0 の LTI をもつリンクが多く, リンク損傷が全体のシステムに影響を与えるリンク が多いことを示している.

次に,表-3にグラフに含まれる全リンクのLTI を平均し MLTI を求めたものを示す.MLTI は,門 前町グラフでは 0.61,十字路グラフでは 0.43,直線 グラフでは 0.98 であり,十字路グラフの MLTI は三 つのグラフの中で最も低く,水源を考えたときの位 相的な強度が優れていることが分かる.逆に直線グ ラフの MLTI は三つのグラフの中で最も高く,位相 的な強度は劣っている.門前町の水道システムは二 つのグラフの中間の値を示しており,集中したグラ フは強固で直線のグラフは脆弱という一般的な水道 システムの強度の知見と一致する.また,本研究で はグラフの一例として特徴的な十字路グラフと直線 グラフを扱ったが,これらの分析から一般の水道シ ステムの MLTI は概ね 0.4 から 1.0 の間に含まれる と考えられる.また,基準化 TI は[0,1]の範囲の中

表-3 各グラフの *TI*(*G*), 基準化 *TI*: δ(*G*), 平均 *TI* 損失率: *MLTI*, (*n*, *l*) = (72,71)

	('=,' -)		
グラフ	TI(G)	$\delta(G)$	MLTI
(a) 門前町グラフ	3.21×10^{13}	0.04	0.61
(b) 十字路グラフ	9.74×10 ¹¹	0.00	0.43
(c) 直線グラフ	8.06×10^{14}	1.00	0.98

表-4 ノード数を半分とした場合の各グラフの TI(G),

$\delta(G), MLT$	I, (n, l) = (36, 35))	
グラフ	TI(G)	$\delta(G)$	MLTI
門前町グラフ	4.23×10 ⁶	0.18	0.61
十字路グラフ	9.68×10 ⁵	0.04	0.42
直線グラフ	2.42×10^{7}	1.00	0.95

表-5 ノード数を増減させた門前町グラフの *TI(G)*, δ(G), *MLTI*, (n, *l*) = (n, n-1)

п	TI(G)	δ	MLTI
18	1.76×10^{3}	0.42	0.57
36	4.23×10 ⁶	0.18	0.61
72	3.21×10^{13}	0.04	0.61
348	1.75×10^{63}	0.00	0.61

で限界値を強調して示す一方で,MLTIは幅をもっ て分散するが,各グラフの指標の値の順は δ も MLTIも同じである.

次に、ノード数を増減させた門前町グラフ、直線 グラフおよび十字路グラフに対しても同様な MLTI の特性を持つことを別途検討した. 表-4 は全体の 構造を変化させない程度にリンクを割愛し、ノード 数を半分 (n=36) にした門前町グラフ、直線グラフ、 十字路グラフに対して MLTI の計算を行った結果を 示している. 門前町グラフの MLTI は 0.61、十字路 グラフの MLTI は 0.42、直線グラフの MLTI は 0.95 となり、共にノード数が二倍のグラフとほぼ同じ値 となった. 以上のことから、どのようなグラフにお いても MLTI は 0.4 から 1.0 の間に該当し、さらに ノード数が変化しても MLTI は敏感に変動しないこ とがわかる.

さらに、元の門前町グラフ(*n*=72)と比べてリン ク数の増減によるグラフの *MLTI* の収束過程を調べ るため、ノード数をある程度増減させて検討を行っ た.検討する門前町グラフの全ノード数は 18,36, 72,348 とした.全体の構造を変化させない程度に リンクを剪定し、各ノード数に調整した門前町のグ ラフを図-6 に示す.また、それぞれのグラフにつ いて *MLTI* の計算を行った結果を表-5 に示す.ノー ドが 36 を超えると *MLTI* は 0.61 に収束しているこ とがわかる.このことから、ノード数が 36 以上で グラフの *TI* が 10³ 以上あれば概ね収束した *MLTI* を 得ることができる.

(3) 震度に対する *TI* システム特性

地震時のシステム強度特性評価への適用性を明ら かにするため、図-4(a)の門前の管路モデルを用い





1.2

て検討を行う. 前述までの分析では、一つのリンク が損傷するか否かの危険度でシステム特性を検討し ていたが、地震時には数ヵ所の被害が同時に発生し、 それによって管路網がいくつかに分断される。そこ で、モンテカルロ法によって無作為に損傷リンクが 与えられた場合の TI 損失率を算出し、計測震度ご とのシステム強度評価を評価する. モンテカルロ法 とは乱数を用いて十分な回数の計算を行うことによ り、解析的に求めることができない問題でも近似的 に解を求める計算手法であり,本手法を用いて異な る損傷パターンにおいても STI の平均とそのばらつ きが明らかになり、水道管路網全体の強度評価を行 うことができる. 管路リンクの損傷パターンの組み 合わせは、計測震度に対する最大速度を算定し¹¹⁾、 それによって管路被害率¹²⁾を求め、管路延長を用 いて全体の損傷件数を制約した. さらにリンク長に より被害発生の重みを与えた上で、モンテカルロ法 により損傷リンクを抽出した.そして、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を求めた.

計測震度 0.1 ごとに試行を 1,000 回行い, STI 及び その平均と標準偏差を求めた.その解析結果を図-7 に示す.計測震度が 5.0 を超えると STI は 1.0 に収 束する.門前の管路モデルにおいて管路被害が 5 箇 所以上出ると管路網のシステム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 観測され⁸,門前町の全戸において断水が確認され ている.計測震度が 5.0 前後の STI が変動する範囲 については検討が必要であるが,計測震度が 6.0 の 場合の STI は 1.0 に収束しており, STI の数値は過 去の地震被害と整合する.

*STI*の特徴をさらに考察するために,既往の他ネットワーク強度指標との比較を行う.比較には前述した Dueñas-Osorio et al. ³⁾の連結性確率, C_L を用いる. *STI*を算出する過程で同時に C_L も算出し,*STI*



図-8 C_LとSTIの平均値の関係

と同様に C_L の平均値と標準偏差を算出した.計測 震度 4.5 以上における C_L と STIの平均値の関係を図 -8 に示す. C_L の平均値は直線的に変化しているが, STI よりも勾配が緩やかである.門前町の水道シス テムは円環状部分がなく樹系状であるため,起点ノ ードから終点ノードへの接続数がそれぞれ一つしか ない.そのため C_L の計算式が 1-(残存ノード数/ ノード数)となってしまい,残存ノード数が直接影 響していることが直線的な変化の原因と考えられる. また, STI がこのように極端に変化しているのも, 円環状部分がないために水道システムがより集中し



表-6 現在と統合以前の門前町における MLTIの比較

-			
-	グラフ	(n,l)	MLTI
-	現門前町	(72, 71)	0.61
	地原水系	(45, 44)	0.63
	北川水系	(28, 27)	0.56
	皆月地区	(7, 6)	0.54
_	地原水系 北川水系 皆月地区	(45, 44) (28, 27) (7, 6)	0.63 0.56 0.54

ているためと考えられる.円環状のある水道システ ムであれば、2 つの指標はより漸近してくると考え られる.また、STI はグラフの位相的な強度指標で ある TI がベースとなる指標であり、ノード同士の 接続数から算出される C_Lとは全く別の意味を持っ ている.システムの位相強度はある損傷箇所を超え ると損傷前のシステム強度を保有していないことを 示している.

5. システム統合による位相特性の変化

昨今の全国における市町村合併にともない,市 町村が持つ水道システムも統合させようとする動き が高まっている.日常時の維持管理の簡便さやコス ト縮減のみを求めた水道システムの統合が行われが ちで,統合による位相的な強度の変化が考えられて いないのが現状である.前述した石川県輪島市門前 町も元々3つの区域に水源と小規模システムが形成 されていたが,地原ダムの建設により統合された水 道システムである.事例分析として,以前の小規模 水道システムについて強度評価を行い,現在の統合 された水道システムの強度と比較を行うことで,水 道システムの統合がシステムの位相的な強度に与え る影響を調べる.

強度評価を行う過去の門前町の水道システムは、 門前町の持つ2つの水系(地原水系と北川水系)と、 統合前に湧水供給を行っていた皆月地区にあたる3 つの範囲において分割したグラフを用いた.図-9 に水系の範囲と水源ノードの位置を●で示す.水源



図-10 現在と統合以前の門前町における STI の比較

ノードはそれぞれの浄水場の位置とした.3 つのグ ラフについて MLTI 及び STI を適用し、グラフの位 相的な強度評価を行った.MLTI の結果を表-6 に示 す.現在の門前町の MLTI が 0.61 であるのに対し、 地原水系の MLTI が 0.63 と現在の門前町の MLTI を 上回り、対して北川水系の MLTI が 0.56、皆月地区 の MLTI が 0.54 と現在の門前町の MLTI を下回って いる.これは現在の門前町の水道システムが、統合 以前の北川水系と皆月地区の水道システムに位相的 な強度という点で劣っている.

さらに、STI を用いて計測震度ごとの水道管路網 の強度評価を行った.解析は 4.(3)で行った解析と 同じ条件を用いて行い,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 を求めた.計 測震度 0.1 ごとに試行を 1,000 回行い, STI 及びその 平均を求めた. 解析結果を図-10 に示す. 統合前の 水道システムは現門前町の水道システムに比べ、管 路の総延長が短いために被害が出始める計測震度が 地原水系と北川水系で 0.1, 皆月地区では 0.3 高く なっている.また、曲線の傾きをみても現門前町の 水道システムに比べて統合前の水道システムが緩や かなカーブを描いていることがわかる. 地震時の現 門前町における水道システムは統合前の水道システ ム比べて位相的な強度は低下していること評価でき る.一方で,現在の門前町の MLTI が地原水系の MLTI を上回っていることから統合によってグラフ の位相的な強度は向上している.

実際の水道システムを例にして, TI を適用して システム統合によるシステムの位相強度の変化を示 すことができた.システムの統合により必ずしもシ ステムが頑強になるとは限らないことが示された. 水道システムを管路の耐震化率だけではなく,位相 強度も合わせて考慮することが重要である.本研究 で示した指標はシステム特性を表す指標の一つに過 ぎないが,このようなシステム特性を考慮できる指 標を用いた適切な評価によって地震時の水道システ ムにおける位相的な強度の低下を最小限に抑える検 討を踏まえたシステムの統合が望ましい.

6. 結論

本研究は分子化学の知見に基づいた TI を援用し て配水管水道管路網のシステム特性を評価する指標 を提案した.さらに,実管路網のシステム特性評価 に適用し,ネットワークの形状や規模に対する適用 性を確認し,システム統合によるシステム特性の変 化を検討した.本研究の結論は以下にまとめられる.

- 実際の水道管路網に対して、リンクが損傷した場合に水源側の残余水道システムのシステム強度の損失変化を評価できる指標、LTI及び MLTIを適用できることを確認した。一般的な樹系もデルの場合、MLTIは 0.4 から 1.0 の間に収束することがわかった。また、リンク数が増減しても形状が変わらない限り、MLTIは変動せず、既往の基準化 TI、δよりも適用性がある。
- 本研究で提案した地震時 TI 損失率, STI は既往の連結性確率よりもシステムの低下に敏感に反応する指標であることが確認できた.
- 実際の水道システムを例にして、TIを適用して システム統合によるシステムの位相強度の変化 を示すことができた.システムの統合により必 ずしもシステムが頑強になるとは限らないこと が示された.

今後の研究として、本研究で適用した水道システムは門前町のもののみであったが、都市域の複雑な 形状の水道システムへの適用性の検討を行い、システム統合による位相強度への影響を評価していくこ とが望まれる. **謝辞**:本研究の遂行にあたり,輪島市より貴重な資料を提供していただいた.ここに記して感謝する.

参考文献

- 1) (社)日本水道協会:水道事業ガイドライン, 2005.1.17
- (社)日本水道協会:市町村合併に伴う水道事業統合の 手引,2004.1
- Due nas-Osorio, L., Craig, J. I. and Goodno, B. J: Seismic response of critical interdependent networks, *Earthquake Engng Struct. Dyn*, Vol.36, pp.285-306, 2007
- 4) Chang, S. E. and Nojima, N.: Mesuring post-disaster transportation system performance, the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research*, Pt. A, Vol.35, pp.475-494, 2001.
- 5) 星谷勝,山本欣弥:情報エントロピーを用いたシス テムの信頼性と冗長性の検討,土木学会論文集 I/No.654, pp.355-366, 2000.7
- 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.
- 7) 岡田憲夫,梶谷義雄,榊原弘之,多々納裕一:直下型地震の発生を想定した都市圏道路網の分散・集中特性の性能モデルに関する研究,土木学会論文集, pp93-103, 1999.10.
- 3) 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
- 国土地理院:数値地図 25000(空間データ基盤)石川県, 2005.
- 10) 門前町上水道事業:被災復旧箇所位置図, 2007
- 21) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄:計測震度と旧気象 庁震度および地震動強さの指標との関係,地域安全 学会論文集, Vol.1, pp.51-56, 1999.
- 12) (社)日本水道協会:地震による水道管路の被害予測, 1999.11

Effect of Water Supply System Integration to Topological Strength Using Topological Index

Tasuku OKAMOTO and Yasuko KUWATA

This study proposes a new system strength index by using the topological index based on graph theory and clarifies its applicability to the real water pipeline network. Moreover, this study analyzes the system strength of water supply system under the seismic intensity level with regard of integrated system and prior- independent systems and clarifies that the integration of water pipeline network does not always inprove topological strength of the system.