

水道統計に基づく 全国水道事業者の配水管路網の脆弱性評価

能島 暢呂¹・加藤 宏紀²

¹正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:nojima@gifu-u.ac.jp

²非会員 岐阜大学産官学連携研究員 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:kato_hir@gifu-u.ac.jp

平成22年度版の水道統計に記載された全国水道事業者の配水管（本管＋支管）に関するデータを用いて、地震に対する弱さを定量化した「脆弱性指数」を集計し、脆弱性指数と種々の統計指標との関連や、埋設管の耐震適合性を考慮した管種区分の変更（平成19年度以降）が脆弱性指数評価に及ぼす影響について考察を行った。また、脆弱性指数のばらつきを地域格差にとらえ、経済学分野で用いられるジニ係数を用いてその定量的評価を行った。さらに、平成6～22年度版の水道統計を用いて、脆弱性指数および耐震化率の経年推移を示して長期トレンドに関する考察を行った。

Key Words : water distribution pipeline, seismic vulnerability, vulnerability factor, Gini coefficients

1. はじめに

わが国では、これまでの多数の既往被害の教訓を活かしてライフライン系の地震対策が進められてきた。特に1995年兵庫県南部地震のインパクトは大きく、これを契機に対策が強化されてきた。上水道システムに関しては、厚生労働省は2004年6月に「水道ビジョン¹⁾」を公表し、基幹施設を中心とした水道施設の耐震化の推進を主要施策の一つとして挙げ、基幹管路の耐震化率100%の目標を掲げている。これを受ける形で、管路やその他の水道施設の耐震化の促進を図ることを目的とする検討が実施され²⁾、「水道の耐震化計画等策定指針⁴⁾」が策定されるに至った。

筆者らは、阪神・淡路大震災以降のライフライン施設の地震時脆弱性の改善程度や水道事業者ごとの格差、全国的にみた地域分布などの定量的把握を目的として、埋設管路施設の脆弱性指数を定義し³⁾、その簡易評価法を提案した⁶⁾。さらに、上水道システムを対象として、平成17年度版「水道統計（施設・業務編）⁷⁾」の統計データに基づいて、全国の現状と経年変化の状況について比較・考察した⁸⁾。

同様の趣旨に基づいて、本研究では、平成22年度までの水道統計データを追加し、配水管路網の脆弱性指数の

再評価を行ったものである。再評価にあたっては、いくつかの新たな視点から分析を行うこととした。

第一点目として、配水管路網の耐震性評価に関する情勢^{2,4)}を踏まえていくつかの管種について耐震適合性を有すると判断されたことを受け、平成19年度以降、管種区分が変更されたことを考慮した脆弱性指数評価を行う。具体的には、管種区分変更を反映しない（耐震適合性を考慮しない）従来評価に加えて、管種区分変更を反映した（耐震適合性を考慮した）評価を新たに行い、管種区分変更が及ぼす影響について考察する。これについては2.と4.で述べる。

第二点目として、水道統計に記載の統計データから、全国水道事業者の配水管路網を表すいくつかの特性値を抜粋（配水管延長、給水面積、給水人口）もしくは導出（配水管密度、給水人口一人あたり配水管延長）し、脆弱性指数との関連について考察する。これについては3.と4.で述べる。

第三点目として、脆弱性指数のばらつきを地域格差にとらえ、経済学分野で用いられるローレンツ曲線とジニ係数を用いて、全水道事業者間の格差、都道府県間の格差、および都道府県内の水道事業者間の格差について定量的評価を試みる。これについては5.で述べる。

第四点目として、平成6～22年度版の水道統計を用い

表-1 水道埋設管の管径係数 C_d と管種係数 C_p (文献⁹⁾に加筆)

管径 (mm)	管径係数	管種	管種係数
～φ75	1.6	CIP 鋳鉄管	1.0
φ100～150	1.0	DIP ダクタイル鋳鉄管 (普通継手：A型, K型, T型)	0.3
φ200～250	0.9	DIP ダクタイル鋳鉄管 (耐震継手：S型, SII型)	0.0
φ300～450	0.7	SP 溶接鋼管	0.3*
φ500～600	0.5*	SGP ねじ継手鋼管	4.0*
φ700～1000	0.4#	VP 硬質塩化ビニル管	1.0
φ1100～	0.2#	ACP 石綿セメント管	2.5*

て、脆弱性指数および耐震化率の経年推移を示し、長期トレンドおよび耐震適合性の及ぼす影響に関する考察を行う。これについては6.で述べる。

2. 脆弱性指数の評価方法

(1) ライフライン埋設管路の被害予測手法

埋設管路の被害箇所数を予測する場合、被害率（被害箇所数／布設延長距離）を求める被害率関数が用いられることが多い。地震動強度（最大加速度，最大速度，SI値など）の関数として規定される標準被害率を設定し、管種・管径・地盤条件に応じて定められた補正係数を乗じて求められる⁹⁾。

高田ら⁹⁾は、兵庫県南部地震による水道管路被害データに基づいて、直下型地震特性を考慮した管路及び属具（空気弁，制水弁，消火栓など）の被害予測手法を提案した。管路の被害分析の結果得られた管径係数および管種係数を表-1 に示す⁹⁾。管径についてはφ100～150mmを、管種については鋳鉄管を基準としてそれぞれの補正係数を1.0としている。一部の管径・管種区分では、布設延長距離が短いため、分析結果の信頼性が低く、文献⁹⁾では参考値として扱われている（*印を付けて表示）。なお文献⁹⁾では、φ600を超える管径区分の記載がないため、表-1 では他の評価事例を参考にして補完して表示している（#印を付けて表示）⁹⁾。

(2) 脆弱性指数の評価式

鈴木ら⁹⁾は、上記予測手法のうち「脆弱性」を表す要素に注目して、「脆弱性指数 V 」という指標を提案した。これは、管径係数と管種係数との積を、対応する管径・管種別の布設延長距離で重み付けして平均して求められるもので、値が大きいほど脆弱性が高く、被害を受けやすいことを示す。

$$V = \frac{\sum_i \sum_j C_{d_i} C_{p_j} L_{ij}}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \quad (1)$$

ここに、 C_{d_i} ：管径区分 i の補正係数，
 C_{p_j} ：管種区分 j の補正係数，
 L_{ij} ：管径・管径別の布設延長距離。

式(1)では管径・管径別の布設延長距離のクロス集計表が必要である。しかしその収集は一般的には困難であるため、管径別および管種別の集計データに基づいて、式(2)による脆弱性指数 V_{pd} で代用する簡易評価法が提案されており⁹⁾、本研究ではこれを用いる。

$$V_{pd} = V_d \cdot V_p = \frac{\sum_i \left(C_{d_i} \sum_j L_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \cdot \frac{\sum_j \left(C_{p_j} \sum_i L_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j L_{ij}} \quad (2)$$

ここに、 V_d ：管径別脆弱性指数，
 V_p ：管種別脆弱性指数，
 $\sum_j L_{ij}$ ：管径別布設延長距離，
 $\sum_i L_{ij}$ ：管種別布設延長距離。

(3) 水道統計の記載内容の変遷とその扱い

水道統計⁷⁾の管径区分について述べる。導水管および送水管については、300mm未満から2000mm以上の6区分、配水本管（直接給水装置を分岐しないもの）および配水支管（直接給水装置を分岐するもの）については、50mm未満から2000mm以上の25区分となっている。管種区分については、平成20年度版以降、表-2の左欄に示すように、管種別は9種類で、継手種別とあわせると16区分となっている。

過去を遡って平成2～22年度版における記載事項を見ると、主要な相違点は次のとおりである。

- 1) 平成2～5年度においては、布設延長距離について、導水管・送水管・配水本管・配水支管の区別がなされていない。平成6年度以降は区別されている。

表-2 平成 22 年度水道統計⁷⁾における管種区分と脆弱性指数の評価に用いた管種係数 C_p

管種	管種係数 (耐震適合性を考慮 せず：H17ベース)	管種係数 (耐震適合性を考慮)
CIP 鋳鉄管	1.0	1.0
DCIP ダクタイル鋳鉄管（耐震型継手を有する）	0.0	0.0
DCIP ダクタイル鋳鉄管（K 形継手等を有するもののうち 良い地盤に布設されている）	0.3	0.0
DCIP ダクタイル鋳鉄管（上記以外・不明なものを含む）	0.3	0.3
SP 鋼管（溶接継手を有する）	0.3	0.0
SP 鋼管（上記以外・不明なものを含む）	4.0	4.0
ACP 石綿セメント管	2.5	2.5
VP 硬質塩化ビニル管（RR ロング継手等を有する）	1.0	0.0
VP 硬質塩化ビニル管（RR 継手等を有する）	1.0	本管 1.0 支管 0.0
VP 硬質塩化ビニル管（上記以外・不明なものを含む）	1.0	1.0
CP コンクリート管		
LP 鉛管		
PE ポリエチレン管（高密度、熱融着継手を有する）		
PE ポリエチレン管（上記以外・不明なものを含む）		
SUS ステンレス管（耐震型継手を有する）		
SUS ステンレス管（上記以外・不明なものを含む）		

- 平成 2～5 年度においては、ダクタイル鋳鉄管の耐震継手と非耐震継手の区別がなされていない。平成 6 年度以降は区別されている。
- 平成 2～16 年度においては、鋼管とポリエチレン管について、耐震継手と非耐震継手の区別がなされていない。平成 17 年度以降では区別されている。
- 平成 19 年度版以降、ダクタイル鋳鉄管で K 形継手等を有するもののうち良い地盤に布設されているものと、硬質塩化ビニル管のうち RR ロング継手を有するものとが区別されている。
- 平成 20 年度版以降、硬質塩化ビニル管のうち RR 継手等を有するものが区別されている。

上記の 4), 5)の背景は以下のとおりである。「平成 18 年度 管路の耐震化に関する検討会報告書³⁾」において、導水管、送水管、配水本管を「基幹管路」、配水支管を「それ以外の管路」と位置付け、基幹管路には高い安全性を確保すべきとした。そのうえで、管路被害の実績データや水道管業界団体による仕様データ、水道事業体からのヒアリング結果等に基づいて、耐震性能への適合性について整理が行われている。基幹管路・配水支管の 2 区分とレベル 1・レベル 2 地震動の 2 区分で整理されているが、配水支管とレベル 2 地震動の組み合わせについては「システムとしての代替性の確保、多重性等により総合的に達成されるものであると考えられることから、整理から除外」とされている。表-3 にその検討結果を抜粋してまとめて記載する。

(4) 平成 22 年度版による脆弱性指数の評価方針

平成 22 年度水道統計⁷⁾に記載された全国 1,541 の上水道事業者を対象とした脆弱性指数の評価方針について説明する。実際に評価対象とするのは所要データがそろっている 1,435 事業者である。本研究では、基幹管路に分類される配水本管に配水支管をあわせて、配水管全体として扱う。評価にあたっては、表-1 に管種係数が設定されていない管種（コンクリート管、鉛管、ポリエチレン管、ステンレス管、その他、の 5 区分）については、布設延長距離が短く、全体の評価には大きく影響を及ぼさないと判断されることから、評価の対象外とする。

管種係数については、前報⁶⁾との連続性を考慮して、平成 17 年度版当時の分類に従った設定に加えて、上述の耐震適合性に関する検討結果を考慮した設定を行う。表-2 右欄に示すように、ダクタイル鋳鉄管（K 形継手等）、鋼管（溶接継手）、硬質塩化ビニル管（RR ロング継手等）の係数を 0.0 にしたほか、配水支管については、硬質塩化ビニル管（RR 継手等）についても 0.0 とした。表-3 では耐震適合性についてやや慎重な記載がなされている点を考慮すると、これらの設定では脆弱性指数を過小評価する可能性を含んでいる。しかしここでは、平成 17 年当時の設定とあわせて評価値の幅を抑える目的で、こうした設定とした。

表-3 配水支管・基幹管路の管種・継手ごとの耐震適合性（文献²⁾より抜粋して作成）

管種・継手	配水支管が備えるべき耐震性能	基幹管路が備えるべき耐震性能	
	レベル1地震動	レベル1地震動	レベル2地震動
	個々に軽微な被害が生じてもその機能保持が可能であること	原則として無被害であること	個々に軽微な被害が生じてもその機能保持が可能であること
ダクトイル鋳鉄管 (NS形継手等)	○	○	○
同 (K形継手等)	○	○	注1)
同 (A形継手等)	○	△	×
鋳鉄管	×	×	×
鋼管(溶接継手)	○	○	○
配水用ポリエチレン管 (融着継手) 注2)	○	○	注3)
水道用ポリエチレン二層管 (冷間継手)	○	△	×
硬質塩化ビニル管 (RR ロング継手) 注4)	○	注5)	
同 (RR 継手)	○	△	×
同 (TS 継手)	×	×	×
石綿セメント管	×	×	×

注1): ダクトイル鋳鉄管 (K 形継手等) は、埋立地など悪い地盤において一部被害は見られたが、岩盤・洪積層などにおいて、低い被害率を示していることから、良い地盤においては基幹管路が備えるべきレベル2地震動に対する耐震性能を満たすものと整理することができる。

注2): 配水用ポリエチレン管 (融着継手) の使用期間が短く、被災経験が十分ではないことから、十分に耐震性能が検証されるには未だ時間を要すると考えられる。

注3): 配水用ポリエチレン管 (融着継手) は、良い地盤におけるレベル2地震 (新潟県中越地震) で被害がなかった (フランジ継手部においては被害があった) が、布設延長が十分に長いとは言えないこと、悪い地盤における被災経験がないことから、耐震性能が検証されるには未だ時間を要すると考えられる。

注4): 硬質塩化ビニル管 (RR ロング継手) は、RR 継手よりも継手伸縮性能が優れているが、使用期間が短く、被災経験もほとんどないことから、十分に耐震性能が検証されるには未だ時間を要すると考えられる。

注5): 硬質塩化ビニル管 (RR ロング継手) の基幹管路が備えるべき耐震性能を判断する被災経験はない。

3. 統計諸量による全国水道事業者の特徴の分析

脆弱性評価に先立ち、ここでは平成22年度版「水道統計 (施設・業務編)」⁷⁾の基礎統計データの分析に基づいて全国水道事業者の特徴を概観しておく。はじめに配水管延長 (本管+支管) L [km]および現在給水人口 N [人]の分布をそれぞれ図-1と図-2に示す。図中のポリゴンは、国土数値情報ダウンロードサービス¹⁰⁾で提供されている「上水道関連施設データ」の給水区域データを水道事業者ごとに統合したものである。人口の集中する都市部においては、配水管延長が長く給水人口が多いのは、いわば当然のことであるが、給水区域の現在給水面積 A [km²]は水道事業者によって様々であるから、相対比較を可能とするために、

$$\text{配水管密度 } \rho [\text{km/km}^2] = L/A \quad (3)$$

$$\text{給水人口1人あたり配水管延長 } L_{pc} [\text{m/人}] = 1000L/N \quad (4)$$

を求めた。それらの分布を図-3と図-4に示す。

図-5に現在給水人口 N と配水管密度 ρ との関係を示す。配水管密度 ρ はネットワーク形態と関連し、密であ

れば面的に、疎であれば線的にネットワークが展開していることを示唆する。図-5より明らかにシステム規模依存性が認められる。小規模システムでは配水管密度の幅は広く、おおむね $1 \sim 25 \text{ km/km}^2$ の範囲であり、全国平均値は 6.68 km/km^2 である。現在給水人口が100万人以上の大規模システムは、 10 km/km^2 以上の高い配水管密度を持つことがわかる。仮想的に等価な配水管密度を持つ正方形グリッド型のネットワークを考え、その布設ピッチを d [m]とすると、配水管密度 ρ との関係は、簡単な考察から $d=2000/\rho$ で与えられることがわかる。したがって上記の配水管密度の範囲は等価正方形グリッドで $2,000 \sim 80 \text{ m}$ ピッチに相当し、その全国平均値は 299.4 m である。

現在給水人口 N と給水人口1人あたり配水管延長 L_{pc} との関係を図-6に示す。 L_{pc} の全国平均値は 4.95 m であるが、ここでもシステム規模依存性が顕著である。給水人口が数千人以上の規模においては、およそ $2 \sim 30 \text{ m}$ の範囲にあり、小規模になるほど長く、大規模になるほど短くなる傾向がある。給水人口100万人以上では 3.7 m 以下となっており、スケールメリットによる効果と解釈することができる。

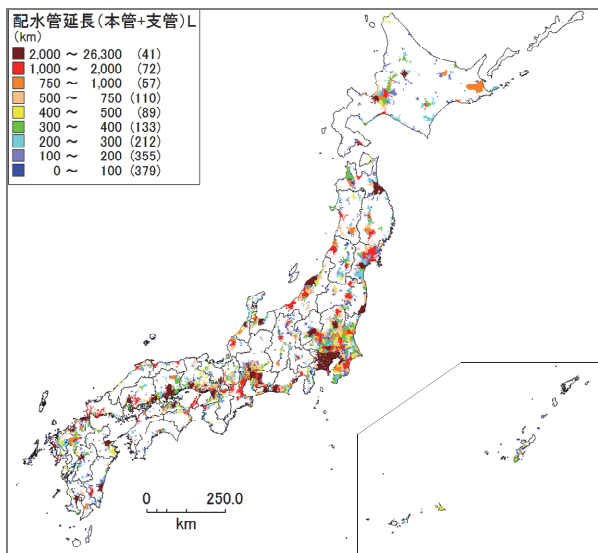


図-1 配水管延長(本管+支管) L の分布

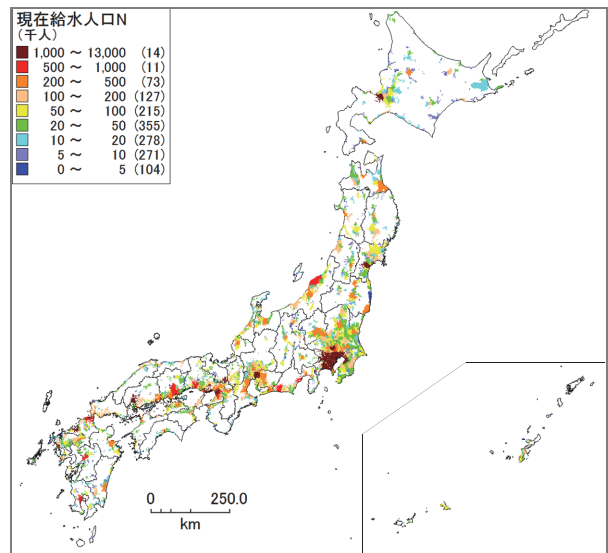


図-2 現在給水人口 N の分布

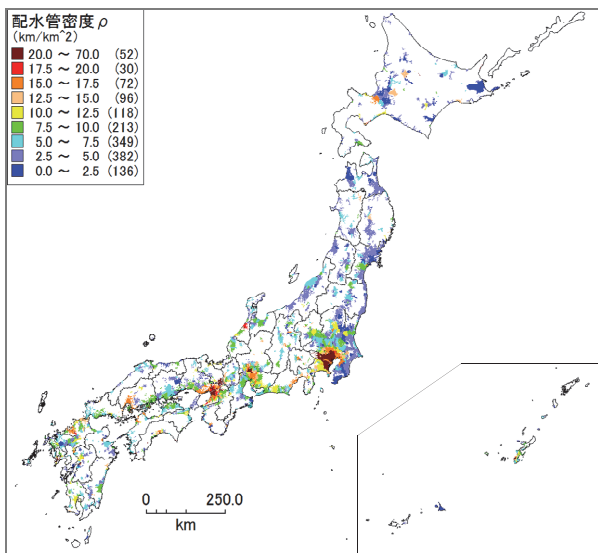


図-3 配水管密度 ρ の分布

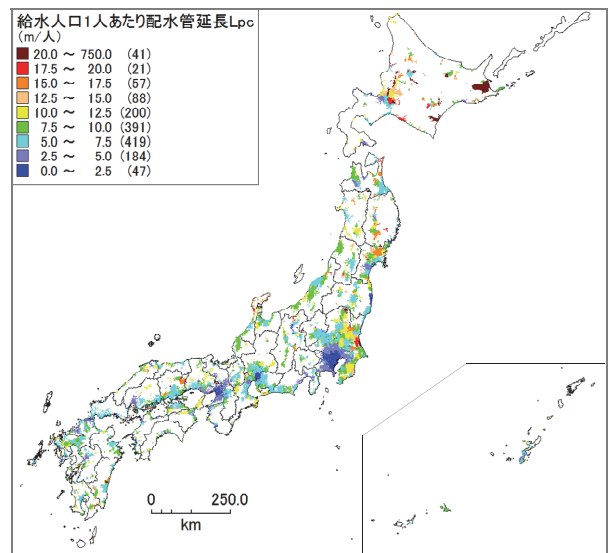


図-4 給水人口1人あたり配水管延長 L_{pc} の分布

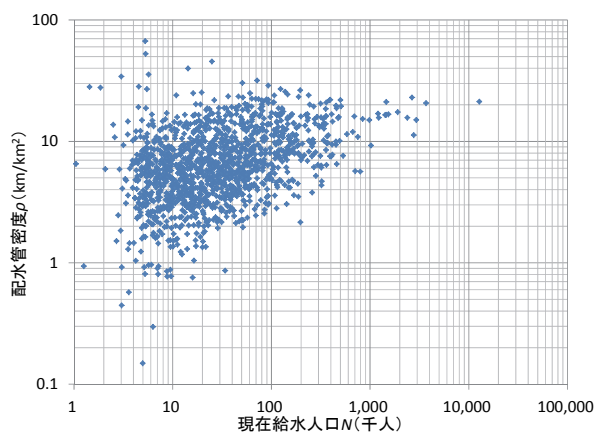


図-5 現在給水人口 N と配水管密度 ρ との関係

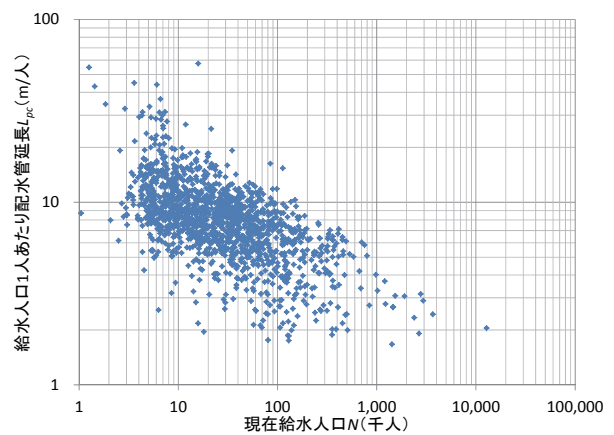


図-6 現在給水人口 N と給水人口1人あたり配水管延長 L_{pc} との関係

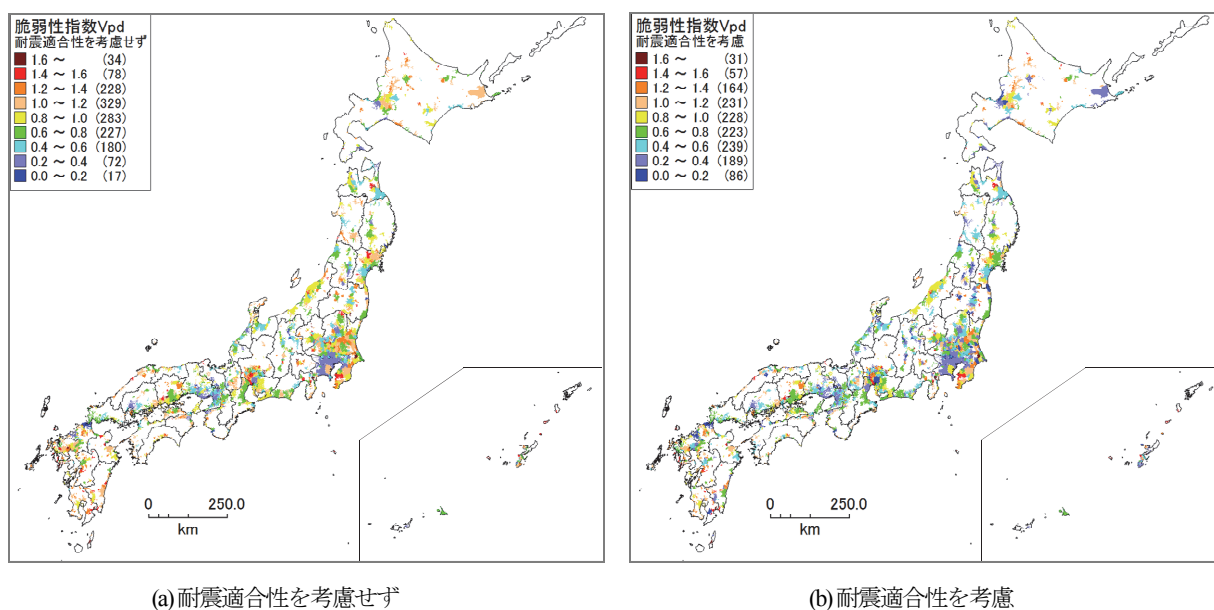


図-7 脆弱性指数 V_{pd} の分布

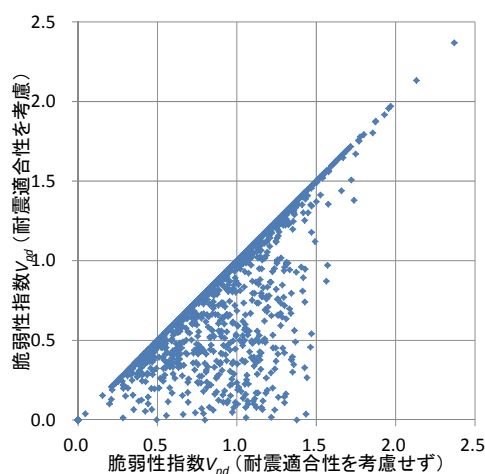


図-8 耐震適合性を考慮しない脆弱性指数と考慮した脆弱性指数との関係

4. 全国水道事業者の脆弱性指数の評価と考察

(1) 全国水道事業者の脆弱性指数の分布とその特徴

算出した脆弱性指数 V_{pd} の分布を図-7 に示す。0.2 から 1.8 程度の範囲でばらついており、レンジ幅は 9 倍以上に及ぶ。全国平均では、耐震適合性を考慮しないケースで 0.741、考慮したケースで 0.626 となった。地域格差が大きいことがわかるが、これについては次章で考察する。

耐震適合性を考慮しない脆弱性指数と考慮した脆弱性指数との関係を図-8 に示す。耐震適合性により管種係数が低減される管種（表-2 参照）を多用している水道事業者では脆弱性指数が著しく低減されている。一方、極端に高い脆弱性指数を示す水道事業者を含めて、ほと

んど変化のないケースも多数あることがわかる。

(2) 脆弱性指数に関する考察

ここでは、耐震適合性を考慮しないケースを対象として、脆弱性指数 V_{pd} と前章で示した統計諸量との関係について考察する。図-9 は配水管延長 L と V_{pd} の関係を示す。ばらつきがかなり大きいものの、大規模システムほど V_{pd} は小さくなる傾向が認められる。しかし、この因果関係を説明する要因としては根拠に欠けるといわざるを得ない。これは例えば、2 つの水道事業者を合併・統合して配水管延長が長くなったとしても、脆弱性指数は両方で平均化されるだけであって、低減しないことから明らかである。そこでネットワーク施設整備の効率性

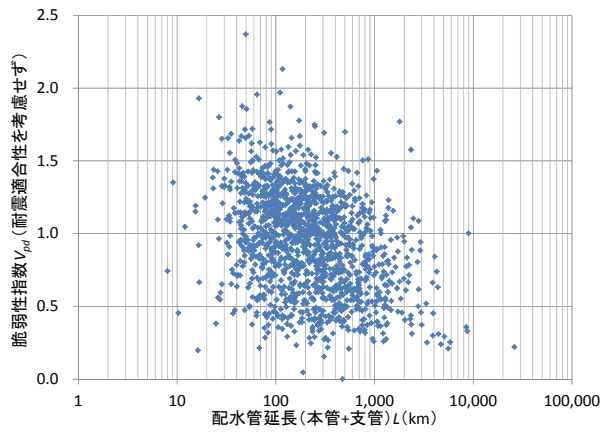


図-9 配水管延長 L と脆弱性指数 V_{pd} との関係
(耐震適合性を考慮せず)

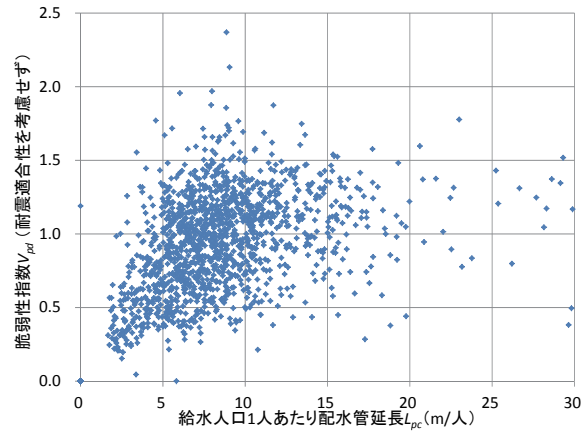


図-10 給水人口 1 人あたり配水管延長 L_{pc} と脆弱性
指数 V_{pd} との関係 (耐震適合性を考慮せず)

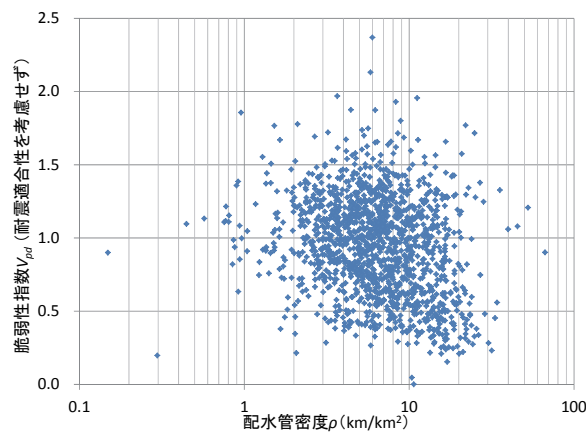


図-11 配水管密度 ρ と脆弱性指数 V_{pd} (耐震適合性を考慮せず) との関係

という観点から、この因果関係の説明を試みる。

図-10 は給水人口 1 人あたり配水管延長 L_{pc} と V_{pd} の関係を示す。 L_{pc} が 10m 以上の領域では飽和しているが、それより短い領域では配水管延長が短いほど V_{pd} が低い傾向が認められ、 L_{pc} の平均値 4.95m 以下で特に顕著である。 上述のスケールメリットにより給水人口 1 人あたりに必要な配水管布設コストが削減でき、良質の管種を採用する余裕があるものと推察される。 逆にいえば、 L_{pc} が短く V_{pd} が高い状況下では、布設替えの効率の高さを生かして良質の管種の採用を推進することが望ましい。

図-11 は配水管密度 ρ と V_{pd} の関係を示したものである。 弱い負の相関がみられるが、ばらつきは非常に大きい。 図-5 に示したように、小規模システムであっても、現在給水面積 A が狭隘な場合には配水管密度は高くなるためである。 そこで、 V_{pd} を管路の質的指標、配水管密度 ρ をネットワークの質的指標と捉えると、この二軸によるクラス分けにより、システムの特徴を位置付けることができると考えられる。 すなわち、右下の領域は面的ネットワークで頑健、右上は面的ネットワークで脆弱、

左下は線のネットワークで頑健、左上は線のネットワークで脆弱、と分類できる。

(3) ライフライン地震時機能被害・復旧予測モデル適用のための等価震度の算出

能島らは、兵庫県南部地震の被災事例に基づいて供給系ライフライン地震時機能被害・復旧予測モデルを開発した¹¹⁾。 これは、計測震度のみを説明変数として初期断水率とその後の復旧曲線を予測するものである。 その予測精度の改善を目的として、地域固有のライフライン施設の脆弱性やライフライン事業者の地震防災対策の効果を考慮できるような改良が進められている。 上水道システムに関しては、脆弱性指数 V_{pd} に基づいて計測震度 I_0 を次式により等価震度 I_{eq} に変換して予測モデルに適用する方法をとっている^{5),12)}。

$$I_{eq} = I_0 + 0.647 \cdot \log_{10} \frac{V_{pd}}{0.446} \quad (5)$$

式中の 0.446 という値は、予測モデル構築の基礎データとされた兵庫県南部地震の被災地域における水道事業者

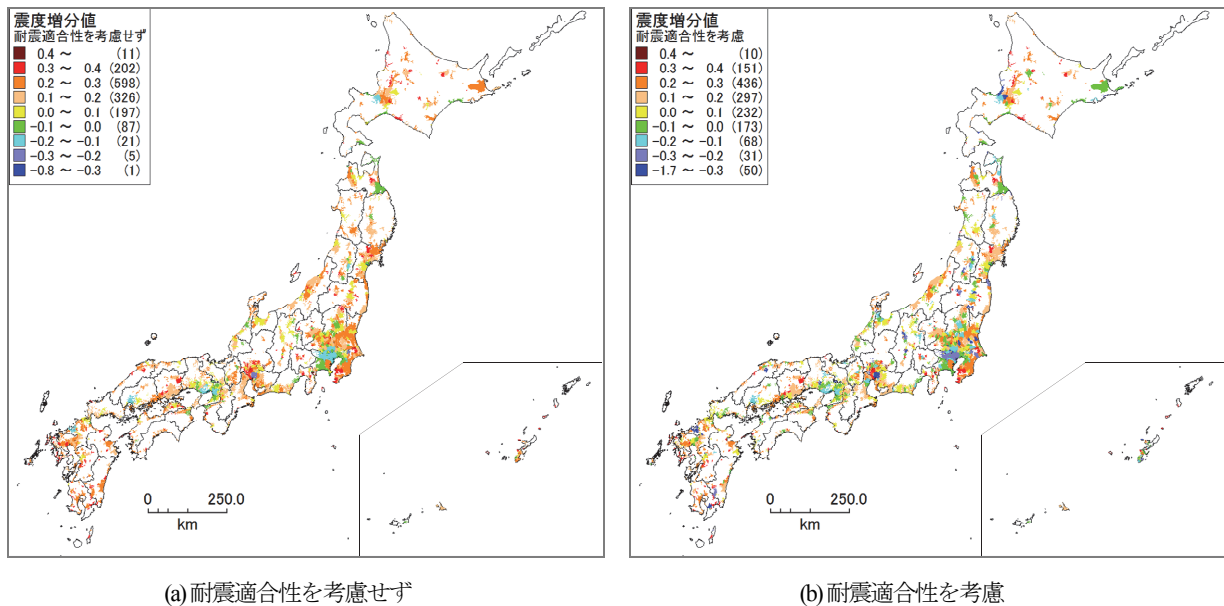


図-12 計測震度を等価震度に変換するための震度増分値

の配水管の平均的な脆弱性指数である。これと評価対象地域の配水管の脆弱性指数 V_{pd} との比に基づく変換式となっている。本研究では、右辺第二項を震度増分値と呼ぶ。

図-7 の脆弱性指数分布に基づいて、震度増分値の分布を求めた結果を図-12 に示す。図-7 の V_{pd} が倍率で 9 倍程度のレンジを持つため、式(5)より等価震度差のレンジは 0.6 程度となる。同一の計測震度であっても、配水管の脆弱性を考慮して予測モデルを適用する場合には、震度階級の「強弱」以上の差が出る可能性があることを意味する。

これまでの適用事例では、便宜的に、都道府県単位¹²⁾あるいは複数県を含む地域単位¹³⁾での脆弱性指数の集計結果に基づいてモデル適用を行ってきた。しかし本研究により図-12 をメッシュデータ化できたので、本来あるべき水道事業者単位での評価が可能となった。これにより地震直後の初期断水率および復旧曲線の評価精度の改善が期待される。

5. 脆弱性指数の地域格差に関する考察

(1) ローレンツ曲線とジニ係数

図-7 および図-8 に示したように、全国水道事業者の配水管の脆弱性指数には大きな格差がある。ここではその地域格差について定量的に考察するため、ジニ係数¹⁴⁾という指標の考え方を導入する。ジニ係数とは、所得格差による不平等さを表すために使われている経済学分野の指標である。世帯を所得の少ない順に並べ、横軸に世

帯数の累積相対度数、縦軸に所得の累積相対度数をとったグラフはローレンツ曲線と呼ばれる。一対一を表す 45 度線とローレンツ曲線との間の面積を 2 倍するとジニ係数が得られる。ジニ係数は 0 から 1 の値をとり、0 に近いと所得格差が小さく、1 に近いと所得格差が大きいことを表す。

(2) 全国水道事業者間の格差

本研究では、横軸に配水管延長の累積相対度数、縦軸に脆弱性指数の累積相対度数をとったローレンツ曲線を算出した。全国水道事業者を対象とした結果を図-13 の実線で示す。耐震適合度を考慮しないケース（青）よりも考慮したケース（赤）の方が下に凸の形状が強調されており、これに基づいてジニ係数を算出すると、それぞれ 0.264 および 0.312 となった。耐震適合性を考慮することにより脆弱性指数が全体的に低減され、格差が縮小することが期待されたが、逆に格差が拡大している。図-7 および図-8 に示したように、耐震適合性が認められた配水管を採用している水道事業者と、採用していない水道事業者との格差が開くことが影響していると考えられる。ジニ係数としては特に大きな値ではないが、地域格差を定量評価することができた。

(3) 都道府県間の格差

より広域的な地域格差について考察するため、都道府県単位での配水管の脆弱性指数 V_{pd} の集計を行った結果を図-14 に示す（後出の図-16 では縦軸にこの V_{pd} をとっている）。脆弱性指数 V_{pd} のレンジは、耐震適合性を考慮しないケースで 0.234（東京都）～1.277（長崎県）、

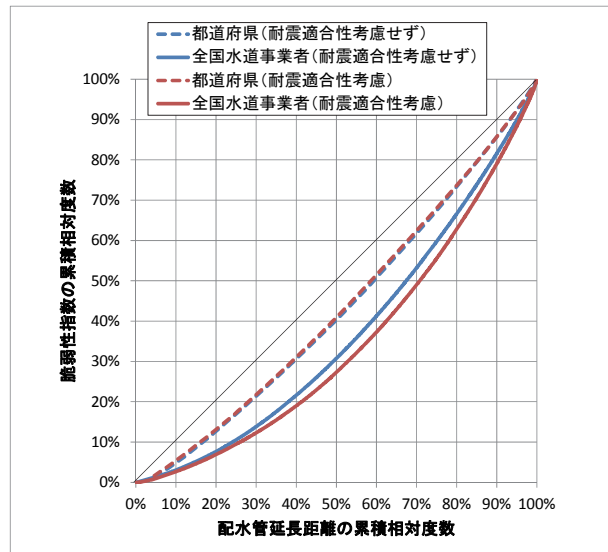


図-13 配水管の脆弱性指数 V_{pd} と配水管延長 L に関するローレンツ曲線

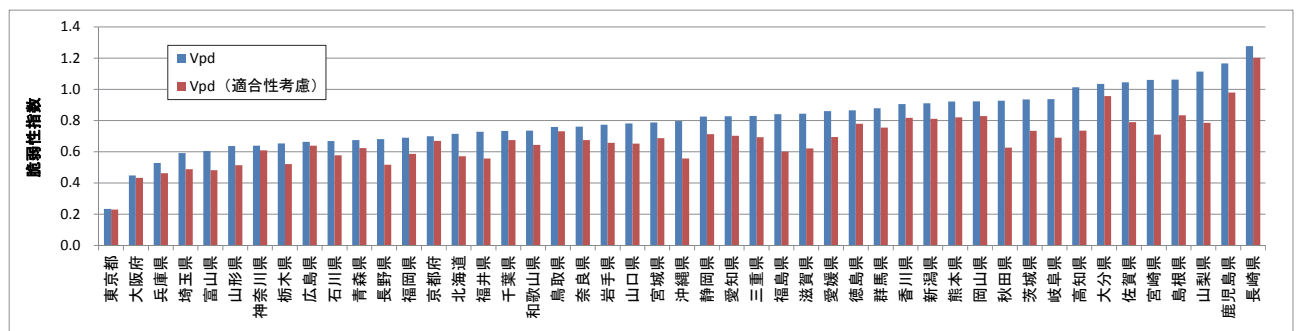


図-14 都道府県ごとの配水管の脆弱性指数 V_{pd} (耐震適合性を考慮しないケース+考慮したケース)

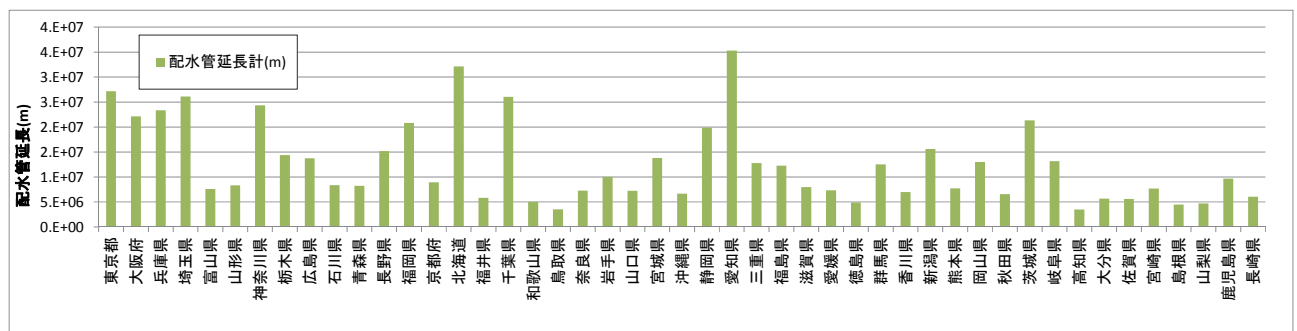


図-15 都道府県ごとの配水管延長 L

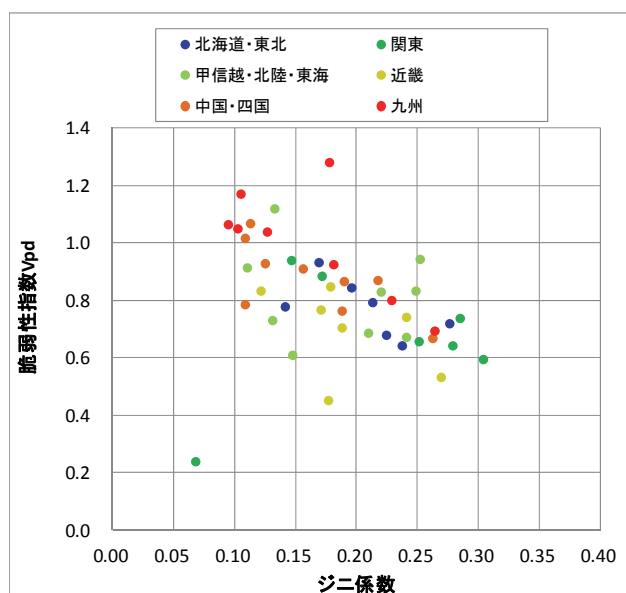
耐震適合性を考慮したケースで 0.229（東京都）～1.202（長崎県）となっており、いずれも 5 倍以上の開きがでている。また配水管延長を都道府県ごとに集計した結果を図-15 に示す。

これらをもとにローレンツ曲線を図-13 の点線のように求め、ジニ係数を算出した。耐震適合性を考慮しないケース（青）で 0.140，考慮したケース（赤）で 0.132 と得られた。都道府県間では、都道府県内の格差が平均化

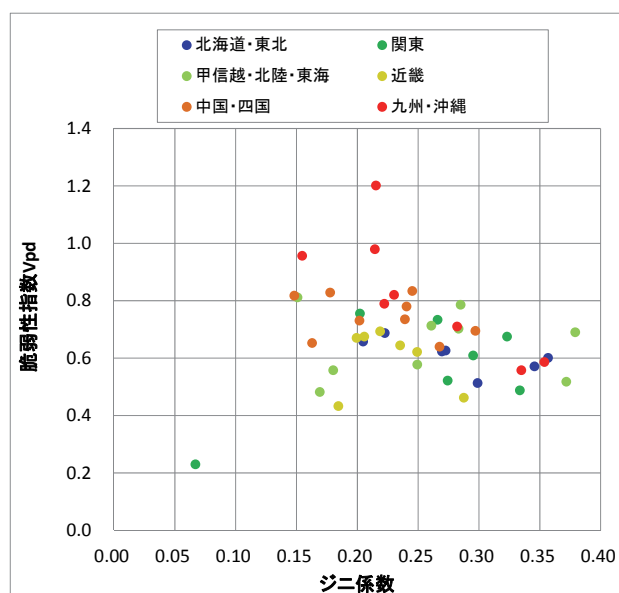
されるため、ジニ係数のとる値は相対的に小さく、耐震適合性の考慮によりわずかに減少している。

(4) 都道府県内の水道事業者間の格差

各都道府県内における水道事業者間の格差について考察するため、都道府県ごとにローレンツ曲線を求め、ジニ係数を算出した。図-16 は横軸をジニ係数とし、縦軸を図-14 の脆弱性指数とした散布図である。地域ごとに



(a) 耐震適合性を考慮せず



(b) 耐震適合性を考慮

図-16 都道府県ごとのジニ係数と脆弱性指数 V_{pd} との関係

色分けしたプロットで示している。ジニ係数のレンジは、耐震適合性を考慮しないケースで 0.069（東京都）～0.305（埼玉県），考慮するケースで最小値は 0.067（東京都）～0.379（岐阜県）でとなっている。

まず耐震適合性を考慮しない図-16(a)に着目する。左下の孤立したプロットは東京都であり、この他に脆弱性指数の低いのは、図-14 からわかるように、大阪府、兵庫県、埼玉県となっている。九州・沖縄地方の県は左上に布置されるものが多い。脆弱性指数は高く県内格差が小さい（換言すれば、おしなべて脆弱である）傾向を示している。中国・四国地方もこれに準じた傾向を示しており、脆弱性が高い 8 県のうち山梨県を除く 7 県は九州・中国・四国地方で占められている。北海道・東北地方については、脆弱性指数、ジニ係数ともに中間的な傾向を示す。

次に耐震適合性を考慮しない図-16(b)に着目する。プロットが全体的に右下にシフトした形（脆弱性指数が小さく、ジニ係数が大きい）となっており、図-14 にみられる脆弱性指数の下げ幅が大きいほど、ジニ係数の増加幅も大きい傾向を示す。しかし基本的傾向はあまり変わらず、ここでも九州・中国・四国地方の県が左上に多く布置されている。

6. 水道統計（平成 6～22 年度）に基づく脆弱性指数と耐震化率の経年推移

ここでは、過去の水道統計⁷⁾を遡って調査し、全国の

脆弱性指数および耐震化率の経年推移を明らかにする。2.(3)で述べたように、水道統計の管種区分は年々変化しているので、平成 6～17 年度を対象とした前報⁶⁾では、平成 16 年度以前のデータとして次の 2 ケースを設定して検討した。

【Case A】鋼管とポリエチレン管の耐震化率を平成 17 年度と同等の値とする（脆弱性指数のとりうる値の最小値を評価）。

【Case B】鋼管とポリエチレン管の耐震化率をゼロとする（脆弱性指数のとりうる値の最大値を評価）。

本研究では、平成 16 年度以前の扱いとしては上記 Case A を採用するものとする。平成 19 年度以降に導入された耐震適合性については、考慮する場合としない場合を比較する。

また耐震化率については、耐震適合性を考慮しないケース（平成 17 年度ベースの評価）では、ダクタイル鋳鉄管（耐震型継手）、鋼管（溶接継手）、ポリエチレン管（高密度、熱融着継手）を耐震性を有するものとした。耐震適合性を考慮するケースでは、配水本管に関してはこれらにダクタイル鋳鉄管（K 形継手等を有するもの）のうち良い地盤に布設されている）、ステンレス管（耐震型継手）、硬質塩化ビニル管（RR ロング継手）を加えた。配水支管に関しては、さらに硬質塩化ビニル管（RR 継手）を耐震性を有するものとした。

図-17 は、簡易評価による配水管（本管＋支管）の脆弱性指数と耐震化率の推移を示したものである。脆弱性指数はほぼ一定のペースで値が減少しており、平成 7～

22 年度の 15 年間で 1.004 から 0.741 に減少した (74%) . 耐震適合性を考慮すると 0.626 まで減少しているが (62%) , データ区分上の変化も含まれるため, 経年変化の実態については不明である. 耐震化率は 3.1% から 10.4% に増加した (3.4 倍) . 耐震適合性を考慮すると, 17.2% に達する (5.5 倍) .

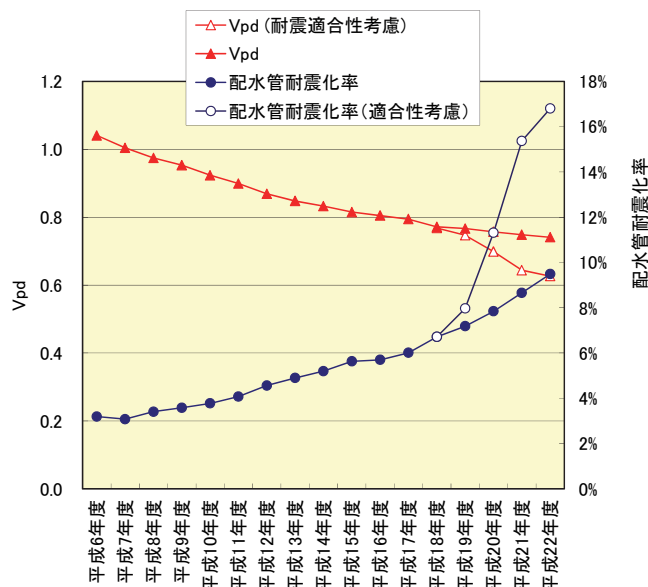


図-17 脆弱性指数と配水管耐震化率の経年推移

7. おわりに

本研究で得られた主な成果を以下に要約する.

- (1) 水道統計 (平成 22 年度版) に基づいて, 全国水道事業者の配水管 (本管+支管) の「脆弱性指数」を評価し, 各事業者の給水区域単位でのマップを作成した.
- (2) これに基づいて, 上水道機能の地震時被害・復旧予測モデルのパラメータである「配水管の地震時脆弱性を考慮した等価震度」を求める際に必要な「等価震度差」の全国マップを作成した.
- (3) 上記マップに関しては, K 形継手ダクタイル鋳鉄管, 溶接鋼管, RR 継手・RR ロング継手硬質塩化ビニル管の耐震適合性を考慮したケースと考慮しないケースについて求めた. 両者の比較から, 脆弱性指数の低減傾向について定量的に明らかにした.
- (4) 全国水道事業者の配水管網を特徴づける統計指標の中から, 脆弱性指数との因果関係の存在が考えられるものとして, 「給水人口一人あたり配水管延長」を挙げた. その短さはスケールメリットと関連付けられ, 布設替えの効果が高いことを示唆している.
- (5) 脆弱性指数のばらつきを地域格差ととらえ, ジニ係数を用いて定量評価した. 耐震適合性の考慮により,

全水道事業者間のジニ係数は 0.264 から 0.312 に増加した. 一方, 都道府県間のジニ係数は 0.140 から 0.132 とわずかに減少した. 都道府県内の水道事業者間のジニ係数については脆弱性指数とあわせて広域比較を行った. 九州・中国・四国地方の県内では, 県内格差が小さく脆弱性指数の高いこと等がわかった.

- (6) 脆弱性指数および耐震化率の全国水道事業者の平均値の経年推移を示して, それらの長期トレンドに関する考察を行った. 耐震適合性を考慮しない場合, 平成 7~22 年度の 15 年間で脆弱性指数は 1.004 から 0.741 に減少し, 耐震適合性を考慮すると 0.626 まで減少することが明らかとなった. 本研究では積極的に耐震適合性を認めるような係数設定を行ったが, 脆弱性指数の過小評価とならないように注意が必要である. 例えば, レベル 1 地震動とレベル 2 地震動で, 耐震適合性を考慮した結果と考慮しない結果を使い分けるなどの方法が考えられる.

謝辞: 本研究を実施するにあたって, 文部科学省「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト (2012~2016 年度) ③都市災害における災害対応能力の向上方策に関する調査・研究」(代表: 林春男 京都大学防災研究所教授) の補助を得た. またデータ整理にあたっては, 岐阜大学工学部 (研究当時) の宮本健嗣君の協力を得た. 記して謝意を表する次第である.

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局: 水道ビジョン, 2004.6 (2008.7改訂) .
- 2) 管路の耐震化に関する検討会: 管路の耐震化に関する検討会報告書, 厚生労働省, 2007.3.
- 3) 水道施設の耐震化に関する検討会: 水道施設の耐震化に関する検討会報告書, 厚生労働省, 2007.9.
- 4) 厚生労働省: 水道の耐震化計画等策定指針, 2008.3.
- 5) 鈴木康夫, 佐藤寛泰, 能島暢呂, 杉戸真太: 埋設管路網の脆弱性を考慮した地震時ライフライン機能の簡易評価モデル, 第 58 回土木学会年次学術講演会, I-349, 2003.9. (CD-ROM)
- 6) 能島暢呂: 脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価 ~上水道配水管網への適用~, 地域安全学会論文集 No.10, pp.137-146, 2008.11.
- 7) (社)日本水道協会: 平成 2~22 年度水道統計 (施設・業務編), 第 73-1 号~第 93-1 号, 1992~2012.
- 8) 損害保険料率算出機構: 地震保険研究 8 自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査, pp.195-256, 2006.7.
- 9) 高田至郎, 藤原正弘, 宮島昌克, 鈴木康博, 依田幹雄, 戸島敏雄: 直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の

- 研究, 水道協会雑誌, 第 70 巻, 第 3 号 (第 798 号), pp.21-37, 2001.3.
- 10) 国土交通省国土政策局国土情報課: 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html> (2013.8.27 取得)
- 11) 能島暢呂, 杉戸真太, 鈴木康夫, 石川 裕, 奥村俊彦: 震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.225-238, 2003.1.
- 12) 能島暢呂: 事業者と利用者の対策効果を考慮した供給系ライフラインの地震時機能停止の影響評価モデル, 地域安全学会論文集 No.15, pp.153-162, 2011.11.
- 13) 能島暢呂, 加藤宏紀: 供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの検証 —東日本大震災の被災事例に基づく—, 地域安全学会論文集 No.18, pp.229-239, 2012.11.
- 14) 中村和之: 所得格差を測る指標, ジニ係数とローレンツ曲線, <http://www.pref.toyama.jp/sections/1015/ecm/back/2005apr/shihyo/index.html>

SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF WATER DISTRIBUTION PIPELINES BASED ON STATISTICS ON WATER SUPPLY IN JAPAN

Nobuoto NOJIMA and Hiroki KATO

Seismic vulnerabilities of water distribution pipelines all over Japan were evaluated based on the database of “Statistics on Water Supply” in terms of “vulnerability factors” proposed by the authors. Relationship between vulnerability factors and several statistical indices describing system characteristics of each water supplier was examined. The effect of recent revision of seismic resistant capability of several types of pipe materials and pipe joints was also considered. The regional disparities of the vulnerability factors were quantified using Gini coefficients, demonstrating a diversity in terms of seismic vulnerability. Long term trend of nation-wide vulnerability factors from 1994 through 2010 was also evaluated.