

# 近年の地震データを考慮した マクロな配水管被害予測式

丸山 喜久<sup>1</sup>・山崎 文雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>千葉大学助教 大学院工学研究科建築・都市科学専攻（〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33）  
E-mail:yamaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>2</sup>千葉大学教授 大学院工学研究科建築・都市科学専攻（〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33）  
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

日本水道協会により提案されている配水管の標準被害率曲線は、1995年兵庫県南部地震における強震観測点から周辺2km四方の配水管被害率によって構築されている。国や自治体が行う地震被害想定調査では、標準被害率曲線が対象地域における配水管被害率、断水率などの推定に用いられている。しかし、日本水道協会が提案する標準被害率曲線に加えて、その変形式が使用される場合もあるなど、地震被害想定調査の実施主体によって様々である。これには、一地震の被害データのみから標準被害率曲線が構築されており、ときに過大な被害率が見込まれてしまうということも多分に影響していると考えられる。そこで、本研究では近年の地震被害データも考慮に入れた新たな標準被害率曲線を提案する。

**Key Words :** *water supply system, recent earthquakes, damage ratio, fragility curve, weighted least squares method*

## 1. はじめに

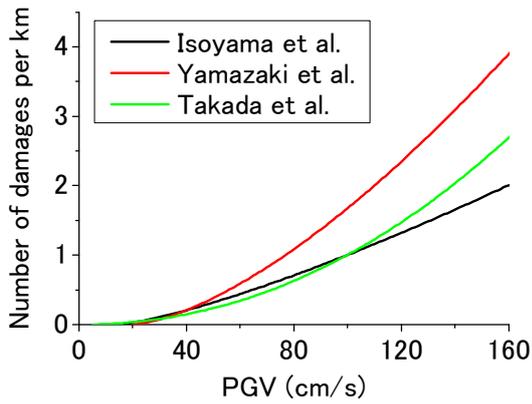
地震被害想定は、自治体やライフライン事業者の地震防災対策の充実、住民の自助力の向上に向けた基礎資料、大地震に対する自治体間の広域連携を推進するための基礎資料として用いられている<sup>1)</sup>。地震被害想定では、発生が想定される地震をいくつか設定し、震源断層、地形・地質、地下構造などの自然条件の調査をふまえて、地震動強さ、液状化の発生などを予測する。これらの予測された外力と建物分布、人口、ライフライン施設、交通輸送施設など社会条件の調査結果をもとに、建物被害、火災被害、人的被害、土木構造物被害、ライフライン被害など多岐にわたる被害量を推定する。得られた内容から、地域防災計画の策定、長期的な減災目標の設定などが行われる。

ライフライン施設のうち上水道施設に関しては、配水拠点施設被害が原因となった断水は施設の停電によるもの以外は生じないと仮定される<sup>2)</sup>ことが多い。これには、1995年兵庫県南部地震による事例や施設の耐震性が向上していることなどが理由として挙げられる。一方で、配水管などの埋設管は復旧に要する時間が長期化することが懸念されるので、地震被害想定においては配水管の被害予測が対象とされることがほとんどである。

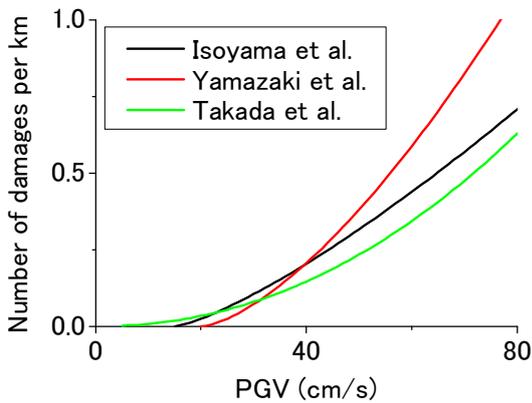
磯山ら<sup>3)</sup>は、兵庫県南部地震時の配水管被害データをもとに水道管路の地震被害予測手法を提案している。この結果は、(社)日本水道協会によって被害予測手法<sup>4)</sup>としてとりまとめられ、地震被害想定調査に広く用いられている。しかしながら、近年では磯山ら<sup>3)</sup>が構築した標準被害率曲線の変形式が地震被害想定に用いられ、配水管に被害をもたらす地震がいくつか発生していることなどをふまえると、単一地震の被害データのみから構築された標準被害率曲線の利用を見直す時期に来ていると考えられる。

そこで、本研究では、磯山ら<sup>3)</sup>が配水管の標準被害率曲線を構築する際に用いた兵庫県南部地震の被害データに加えて、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震の配水管被害データをもとにマクロな配水管被害予測式を構築する。構築された被害予測式を新潟県中越沖地震の柏崎市に適用し実際の被害状況を比較し、推定精度を評価する。また、東京湾北部地震が発生した場合の千葉県における配水管被害率をシミュレーションする。

## 2. 水道管路の地震被害予測手法



(a) PGV:0-160cm/s



(b) PGV:0-80cm/s

図-1 配水管の標準被害率推定曲線の比較

磯山ら<sup>3)</sup>は水道管路の被害率 $R_m$  (件/km) の推定式を以下のように提案している。

$$R_m(v) = C_p C_d C_g C_l R(v) \quad (1)$$

ここで、 $C_p$ は管種係数、 $C_d$ は管径係数、 $C_g$ は地形・地盤係数、 $C_l$ は液状化係数、 $v$ は地動最大速度 (PGV) である。被害率の定義や各種補正係数を用いる考え方は、磯山・片山<sup>5)</sup>の方法がもとになっている。

$R(v)$ は、標準被害率曲線と呼ばれ、式(2)のような関数形である。

$$R(v) = c(v - A)^b \quad (2)$$

標準被害率とは、標準的な管路が一般的な条件で埋設されている場合の被害率のことであり、磯山らは鑄鉄管 (CIP)、管径 $\phi 100-150\text{mm}$ 、沖積地盤に浅く埋設された場合を想定している<sup>3)</sup>。

兵庫県南部地震における強震観測地点で得られた PGV と観測点周辺 2km 四方の領域内での配水管被害率を用いて最小二乗法によって標準被害率曲線を定めると式(3)のようになる。

$$R(v) = 3.11 \times 10^{-3} (v - 15)^{1.30} \quad (3)$$

ここで、定数 $A$ の決定にあたっては、0-30cm/sの範囲で5cm/s刻みで変化させて検討を行い、15cm/sが

適当であるとの判断によって決定されている<sup>3)</sup>。

その他、標準被害率曲線はいくつか提案されており、例えば旧国土庁がとりまとめた地震被害想定手法検討調査<sup>6)</sup>によると山崎らの式<sup>7)</sup>として以下のものが挙げられており、中央防災会議の首都直下地震対策専門調査会でも使用されている<sup>2)</sup>。

$$R(v) = 2.24 \times 10^{-3} (v - 20)^{1.51} \quad (4)$$

また高田らの式<sup>8)</sup>として以下のものも提案されている。関数形には、磯山・片山<sup>5)</sup>と同じものが採用されている。

$$R(v) = 6.33 \times 10^{-5} v^{2.10} \quad (5)$$

式(3)、式(4)は、ある程度以上地震動強さが大きくなければ被害は生じないという見解のもと、地震動下限値 $A$ が設けられている<sup>9)</sup>。また、ある程度地震動が大きくなると、被害率は指数関数的には増加しないという考え方から、ある地震動強さで被害率を頭打ちにして用いる場合もある<sup>10), 11)</sup>。

図-1に、式(3)-(5)を比較する。PGVが80cm/s程度までは3つの式で差は大きくないが、山崎らの式(4)が約50cm/s以上から最も大きくなり、高田らの式(5)が約100cm/s以上で磯山らの式(3)よりも大きくなる (図-1(a))。PGVが0-80cm/sの範囲に着目する (図-1(b)) と、関数形の影響で高田らの式(5)が最も小さな地震動のもとで立ち上がる。山崎らの式(4)の立ち上がり最も遅い (20cm/s) が、40cm/s程度で磯山らの式(3)よりも大きな被害率を示す。

### 3. 近年の被害データを考慮した配水管の標準被害率曲線の構築

#### (1) 配水管被害データ

配水管の標準被害率曲線の構築にあたり、兵庫県南部地震の被害データだけでなく、近年の3地震 (2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震) の配水管被害データも用いることとする。

兵庫県南部地震の配水管被害データは、磯山ら<sup>3)</sup>によってとりまとめられたデータセット (表-1) をもとにしている。配水管被害率は、27地震観測点の周辺2km四方の範囲で算出されている。本研究では、PGVが20cm/s以上の値が得られている場合を検討対象とした。また、地盤の液状化が激しい地点、地震観測記録が構造物の応答の影響を受けていると考えられる地点、PGVが不明な地点は検討に用いないこととした。なお、表-1のDIPはダクタイル鑄鉄管を表す。

近年の3地震の配水管被害データは、兵庫県南部地震のように詳細にまとめられたデータはほとんど公表されていない。そこで、厚生労働省や日本水道協会が公表している配水管被害状況の集計表<sup>12)-14)</sup>を用いることとした。配水管被害データは、市町村単位で集計されており、配水管の敷設延長、被害件数が管種、管径ごとにとりまとめられている。地震動

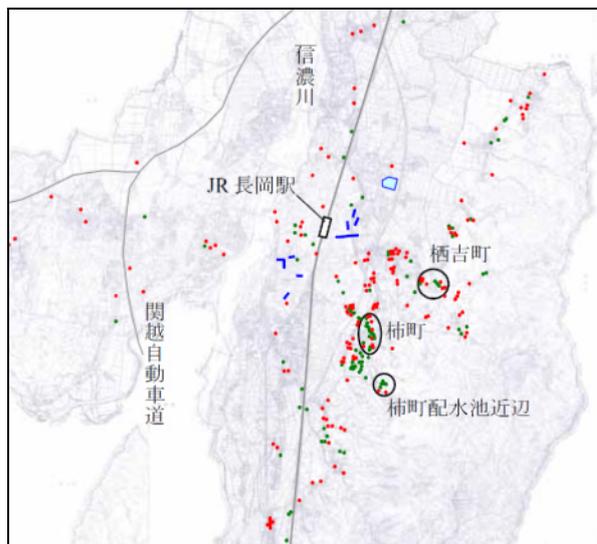
表-1 兵庫県南部地震における強震観測点周辺の配水管被害データ<sup>3)</sup>

地震観測点	PGV (cm/s)	被害件数		管路延長(km)		備考
		DIP	CIP	DIP	CIP	
YR地盤	7.9	0	2	67.96	42.93	※1
大阪管区気象台	18.9	0	3	50.81	25.14	※1
大林組我孫子寮	16.7	0	2	65.2	25.54	※1
淀川大堰	16.3	0	0	49.95	30.55	※1
岩崎供給所	24	0	7	64.15	29.57	
大阪機材センター	27.6	0	1	60.33	26.85	
吉野小学校	31	0	8	65.2	25.54	
淀川大淀堤防	34.7	0	11	29.38	38.48	
阿倍野消防署	29	0	0	53.25	34.52	
JR新大阪駅	34.4	0	2	104.81	24.36	
高見高層住宅建物	34.6	0	6	32.76	25.96	
No.S1001	28.9	0	3	80.9	57.42	※2
神戸大学	55.1	25	23	54.61	9.4	※2
東神戸大橋	91.1	70	13	16.85	0.76	※3
環状線四つ橋	31.2	0	4	83.34	34.33	
ポートアイランド	85.2	25	3	20.93	2.23	※3
尼崎第三発電所	58	3	6	4.33	0.67	
尼崎港	64 <sup>※6</sup>	13	6	7.83	3.23	
神戸港工事事務所	103	48	46	37.83	7.57	※3
JR新神戸	-	1	6	49.89	14.52	※4
新神戸変電所	78	18	12	45.57	4.63	※3
総合技術研究所	58.7 <sup>※6</sup>	1	2	83.96	10.25	
JR鷹取駅	155.8 <sup>※6</sup>	20	16	81.21	17.41	
神戸港第8突堤	184.8	12	48	8.26	6.34	※2 ※3
本山第1小学校	81.6 <sup>※6</sup>	11	14	77.92	5.41	※5
葺合供給所	129.7 <sup>※6</sup>	11	39	68.77	19.24	
神戸海洋気象台	106 <sup>※6</sup>	9	14	78.65	21.14	

※1 PGV20cm/s以下 ※2 構造物 ※3 液状化  
 ※4 PGV不明 ※5 振り切れ補正值を使用  
 ※6 水平2方向合成値

強さは、地形・地盤条件に影響されて空間的なバラツキを有するが、本研究ではマクロに配水管の被害率を推定する標準被害率曲線の構築を目的としているので、対象とする市町村内の地震動強さのバラツキに関してはあえて考慮しないこととする。また、対象市町村で1つの代表地震動強さを地震観測値から決定する。

代表地震動強さは対象地域内に地震計が1箇所しか設置されていない場合は、その地震計が記録した値を使用する。対象地域に複数の地震計が設置され



(a) 長岡市における配水管被害位置<sup>11)</sup>



(b) 長岡市内の地震観測点 (赤線は鉄道)

図-2 新潟県中越地震における長岡市の配水管被害位置と地震観測点

ている場合は、厚生労働省や日本水道協会がとりまとめた被害調査報告書の配水管被害位置図を参照して、被害箇所と近い地震計の観測値を代表値と定めた。例えば、新潟県中越地震における長岡市の配水管被害位置<sup>12)</sup>は図-2(a)に示すように、主にJR長岡駅の東側に分布している。長岡市内の地震観測点は図-2(b)のようであることからK-NET長岡支所の観測PGV(2方向合成値)を代表地震動強さとした。

表-2に、近年の3地震における配水管被害を示す。新潟県中越沖地震における上越市の配水管被害は、上越市柿崎区に集中している<sup>13)</sup>。日本水道協会がとりまとめた「新潟県中越沖地震水道施設被害等調査報告書」<sup>13)</sup>では、上越市全域の配水管敷設延長と被害数が関連づけてまとめられているが、本研究では上越市ガス水道局北部営業所より柿崎区の配水管敷設延長を入手し、表-2のようにまとめた。また、代表地震動強さは柿崎区役所で観測された値を使用した。また新潟県中越沖地震の長岡市における配水管被害に関しても、市内全域に被害が発生しているわけではなく、寺泊や与板地区に集中していることが報告されている<sup>13)</sup>。そこで、配水管敷設延長は長岡

表-2 近年の3地震における配水管被害と敷設延長

市町村 (地震観測点)	PGV (cm/s)	上段：被害件数 下段：延長(km)		
		DIP	CIP	VP
新潟県中越地震				
長岡市 (K-NET 長岡支所)	70.57	84	-	154
小千谷市 (JMA 小千谷)		777.6	-	227.5
	93.5	39	-	20
		234.4	-	29.9
能登半島地震				
旧門前町 (門前町役場)	110.4 <sup>※1</sup>	15	-	25
旧輪島市 (K-NET 輪島)		70.5	3	8
志賀町 (JMA 志賀町)	43.9	52.9	4.9	132.9
穴水町 (K-NET 穴水)		6	-	13
七尾市 (K-NET 七尾)	55.18	198.2	-	191.9
		7	0	0
	103.4	57.7	4	26.2
		12	2	26
	34.79	280.8	11.5	172.4
新潟県中越沖地震				
柏崎市 (鏡町供給所)	113.7	218	13	249
刈羽村 (刈羽村役場)		539	3.4	299.1
長岡市寺泊・与板 (中之島支所)	156.2	72	-	17
上越市柿崎区 (柿崎区役所)		52.484	-	16.01
出雲崎市 (JMA 出雲崎)	35.5	3	3	12
		105.2	5.7	210.1
	93.9	7	-	12
		21.39	-	63.3
	55.4	0	-	6
		3.8	-	82.2

※1 計測震度，最大加速度より換算

市水道局から両地区の延長を入手することでとりまとめた。代表地震動強さは、被害位置との距離および若松らの微地形分類<sup>15)</sup>を考慮して、長岡市中之島支所で観測されたPGVを用いることにした。能登半島地震における旧門前町では、旧門前町役場の震度計で計測震度と最大加速度が記録されている。そこで、計測震度と最大速度，最大加速度の関係式<sup>16)</sup>から、PGVを換算して代表地震動強さとした。なお、表-2のVPは塩化ビニル管を表す。

## (2) 標準被害率曲線の関数形と回帰方法

前章で述べたとおり、配水管の標準被害率曲線は地震動強さに対して指数関数的に増加すると仮定されモデル化されている。式(5)のような関数形では地震動強さがとても小さいときにも、計算上被害が生じてしまうため、式(2)のように地震動強さに下限値が設けられるようになった<sup>9)</sup>。また、地震動がある程度以上に大きくなった場合、被害率は指数関数的に増加しないという考え方から、被害率が頭打ちするような条件式を設けて使用されることもある。

標準被害率の係数ないし定数は被害データと地震動強さを用いた最小二乗法によって決定されるが、式(2)の地震動強さの下限値 $A$ や地震動強さの大きいときの被害率の上限値は、回帰分析によって決まるのではなく、ある範囲でパラメータスタディを行った後、やや主観的に決められることもある。

本研究では、少ないパラメータで被害が発生し始める地震動強さを評価することができ、かつ地震動が大きいときの最大被害率を与えることができるように、標準正規分布の確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて、式(6)のように標準被害率曲線を仮定した<sup>17)</sup>。

$$R(v) = C\Phi((\ln v - \lambda)/\zeta) \quad (6)$$

ここで、 $C$ 、 $\lambda$ 、 $\zeta$ は回帰で得られる定数であり、次の目的関数 $\varepsilon$ を最小化することで求める。

$$\varepsilon = \sum (P_R - R(v))^2 w \quad (7)$$

$P_R$ は実被害データから求められる被害率であり、 $w$ は管路延長である。すなわち、管路延長による重み付き最小二乗法によって回帰定数を決定する。解法には、準ニュートン法による非線形最小二乗法を用いる。

## (3) 標準被害率曲線

表-1、表-2に示した4地震の配水管被害データを用いて標準被害率曲線を構築する。

兵庫県南部地震の配水管標準被害率曲線は、鋳鉄管(CIP)の被害データをもとに構築されている<sup>3)</sup>。表-1に示したとおり、兵庫県南部地震の被災地域ではCIPの敷設延長が充分長い、近年の3地震の被災地域(表-2)ではCIPの延長が短く、市町村によってはCIPが存在しないことも多い。能島<sup>18)</sup>による水道統計データに基づく配水管敷設延長の経年変化を見ても、CIPが全体に占める割合は大きくない。

磯山ら<sup>3)</sup>による兵庫県南部地震における芦屋市、西宮市の被害データの多変量解析結果では、塩化ビニル管(VP)の管種係数 $C_p$ は1.0と定められている。高田ら<sup>7)</sup>による配水管被害予測手法でも同様である。このことをふまえて、近年の3地震の被害データに関しては、CIPとVPを合わせて回帰分析を行い標準被害率曲線を構築することとした。

また、ダクタイル鋳鉄管(DIP)は表-1、表-2ともに充分な延長距離が存在すること、能島<sup>18)</sup>による分析結果でもDIPの延長が配水管敷設延長のうち約50%の割合を占めることから、本研究ではDIPの標準被害率曲線も併せて構築することとした。なお、磯山ら<sup>3)</sup>もDIPの標準被害率曲線を構築しているが、実用上ではCIPの標準被害率にDIPの管種係数0.3を乗じて使用されることがほとんどである<sup>9)</sup>。本研究では、配水管被害予測における管種、管径などの補正係数の値を多変量解析などを行い提案することには至っていないので、DIPの標準被害率曲線はDIPの被害率を予測する際にのみ次章以降で使用する。しかしながら、将来これらの補正係数の見直しを行う場合には、全国的に敷設延長が充分長いDIPの被害率曲線を標準被害率曲線とすることの方が望ましいと考えられる。

表-3にCIPとVPに関する被害率予測曲線を構築する際に使用したデータを示す。CIPに関しては、主に兵庫県南部地震のデータを使用する。表-1に示した磯山ら<sup>3)</sup>のデータセットのうち、PGVが20-30cm/s、30-40cm/sの地点に関しては、元データに被害率0の

表-3 回帰分析に用いた CIP および VP の被害率

(a) CIP 被害率			
観測点・市町村	PGV (cm/s)	被害率 (件/km)	延長 (km)
兵庫県南部地震			
-	32.77	0.13	94.39
-	40.97	0.26	102.28
葺合供給所	129.70	2.03	19.24
JR 鷹取駅	155.80	0.92	17.41
総研+尼崎港+ 尼崎第三発電所	59.88	0.99	14.15
神戸海洋気象台+ 本山第1小	101.03	1.05	26.55
能登半島地震			
七尾市	34.79	0.17	11.5
(b) VP 被害率			
市町村	PGV (cm/s)	被害率 (件/km)	延長 (km)
新潟県中越地震			
長岡市	70.57	0.68	227.50
小千谷市	93.50	0.67	29.90
能登半島地震			
旧門前町	110.35	0.27	94.20
旧輪島市	43.90	0.06	132.90
志賀町	55.18	0.07	191.90
七尾市	34.79	0.15	172.40
新潟県中越沖地震			
柏崎市	113.70	0.83	299.10
刈羽村	156.15	1.06	16.10
上越市柿崎区	93.90	0.19	63.35
出雲崎市	55.40	0.07	82.20
長岡市寺泊・与板	35.46	0.06	210.14

地点が複数含まれていることから、それぞれの区分で管路延長による重み付き平均を算出し回帰分析に使用した。また、これら地点のPGVは2方向最大値で示されていないため、重み付き平均後にAnsary *et al.*<sup>19)</sup>の関係式で2方向合成値に換算した。その他、CIPの敷設延長が短い地点に関しては、同程度のPGVが観測されている地点との敷設延長による重み付き平均PGVを算出し回帰分析に使用した。近年の3地震については、CIP延長が10km以上ある能登半島地震の七尾市におけるデータのみを使用した。VPに関しては、近年の3地震データを使用した。能登半島地震の穴水町では103.4cm/sの大きな地震動が観測されているが、VPに被害が生じなかった。旧門前町の換算PGVは穴水町と同程度であるが、換算値であるため平均値としてはまとめず、穴水町のデータは回帰分析に用いなかった。

表-4にDIPの被害率予測曲線を構築する際に回帰

表-4 回帰分析に用いた DIP の被害率

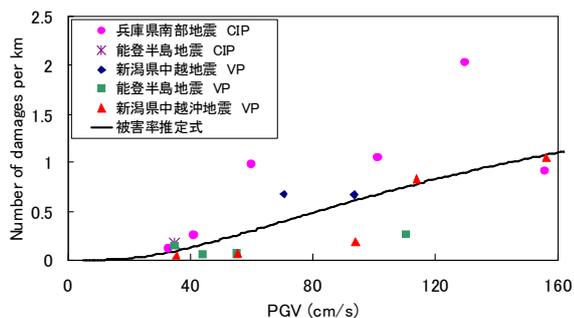
観測点・市町村	PGV (cm/s)	被害率 (件/km)	延長 (km)
兵庫県南部地震			
総研+尼崎港+ 尼崎第三発電所	59.10	0.18	96.1
神戸市立本山第1小学校	81.6	0.14	77.9
神戸海洋気象台	106.00	0.11	78.7
葺合供給所	129.70	0.16	68.8
JR 鷹取駅	155.80	0.25	81.2
新潟県中越地震			
長岡市	70.57	0.11	777.6
小千谷市	93.50	0.17	234.4
能登半島地震			
七尾市	34.79	0.04	280.8
旧輪島市	43.90	0.02	52.9
志賀町	55.18	0.03	198.2
穴水町	103.40	0.12	57.7
旧門前町	110.35	0.21	70.5
新潟県中越沖地震			
出雲崎市+長岡市寺泊・与板	36.15	0.03	109.0
上越市柿崎区	93.90	0.33	21.4
柏崎市	113.70	0.40	539.0
刈羽村	156.15	1.37	52.5

表-5 構築された配水管標準被害率曲線の回帰定数

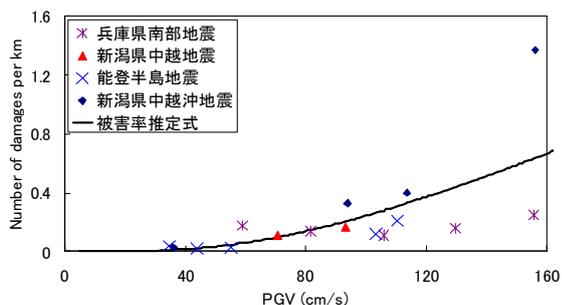
管種	$\zeta$	$\lambda$	C
CIP・VP	0.860	5.00	2.06
DIP	0.864	6.04	4.99

分析に使用したデータを示す。兵庫県南部地震に関しては、PGVが50cm/s以下の観測点周辺ではDIPに被害が見られなかったため回帰分析から除外した。尼崎第三発電所、尼崎港に関してはDIPの敷設延長が10km以下と短いため、同程度のPGVが観測されている総合技術研究所と重み付き平均を取ることで回帰に使用した。新潟県中越沖地震に関しては、出雲崎市中でDIPの敷設延長が短く、さらに被害が生じなかった。そこで出雲崎市と地理的に近い長岡市寺泊・与板地区との重み付き平均を算出することで回帰に用いた。その他のデータに関しては、表-1、表-2に示したものをそのまま用いている。

表-5に回帰分析によって得られた配水管標準被害率曲線の回帰定数を示す。また、図-3に構築された標準被害率曲線を示す。DIPの標準被害率曲線と比べて、CIP及びVPの標準被害率曲線のあてはまりがやや良くないように見える。VP管は管径が小さいものが多く利用されている。能登半島地震における七尾市の配水管被害状況<sup>14)</sup>を見ると、CIPの被害は2件ともφ100mmの配水管で生じている。VPに関しては、26件のうち16件がφ50mm以下の配水管で被害が生じている。本研究では、マクロに配水管被害を予

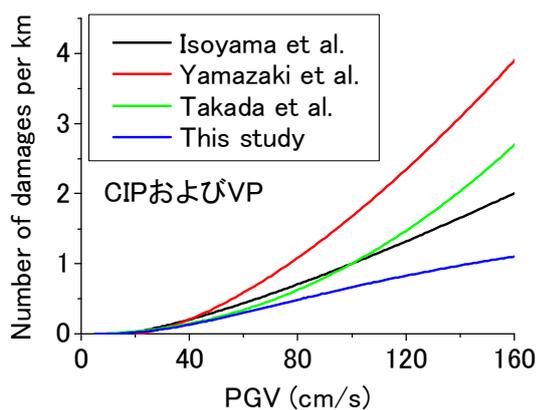


(a) CIP および VP

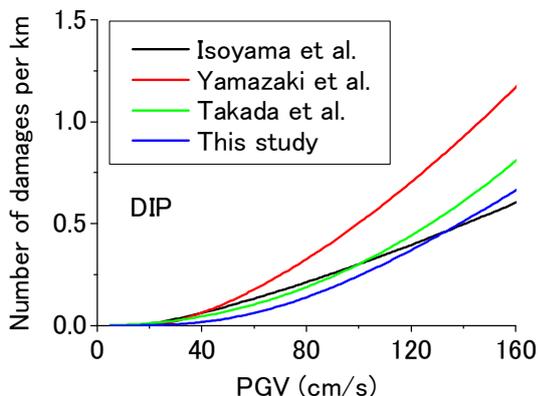


(b) DIP

図-3 本研究で構築した配水管の標準被害率曲線



(a) CIP および VP



(b) DIP

図-4 配水管の標準被害率曲線の比較

測するという目的から、既往の研究をふまえて標準被害率曲線の構築には管径を考慮せず、管径係数による補正を行うことを前提としている。現実には、

管径の小さな配水管の方が、小さな地震動下でも被害率が高くなることが予想されるので、図-3のようなややバラツキのある結果が得られたものと考えられる。この結果をふまえても、今後各種補正係数の検討を行う際には、DIPの標準被害率曲線を基準とする方が望ましいものと考えられる。

既往の研究で提案されている配水管の標準被害率曲線と本研究で構築された標準被害率曲線を図-4に比較する。なお、既往の研究のDIPの標準被害率曲線は、CIPに関するものに管径係数0.3を乗じたものである。本研究で構築した標準被害率曲線は、配水管に被害が生じる地震動強さの下限値を予め設定することなく回帰分析を行っている。関数形として対数正規分布を用いているため、厳密には地震動強さが小さくても被害率は0にならないが、図-4から判断するとCIPおよびVPはPGVが20cm/s程度、DIPは30cm/s程度で被害が生じ始めるように見える。なお、このときに被害率はいずれも約0.02件/kmである。したがって、本提案式を使用するにあたっては、これらの地震動強さ以下の場合には、配水管の被害率を0とすることが適当と思われる。また、CIPおよびVPの標準被害率曲線には、地震動が大きいときに被害率が頭打ちになる傾向が現れている。概して言えば、本研究の標準被害率曲線は既往の研究のもの比べて、小さめの被害率を予測する傾向にある。

#### 4. 地震時の配水管被害シミュレーション

##### (1) 新潟県中越沖地震における柏崎市の配水管被害

本研究で構築した標準被害率曲線による配水管被害の予測結果と2007年新潟県中越沖地震における柏崎市の実被害データを比較する。具体的には、配水管の敷設データ<sup>20)</sup>と柏崎市ガス水道局がとりまとめた配水管被害の状況をGIS化し、本研究の標準被害率曲線から推定される被害率と実被害率を250mメッシュ単位で比較する。

標準被害率曲線はPGVの関数として定義されているので、新潟県中越沖地震のPGV分布が検討が必要となる。本研究では、基盤面(S波速度600m/s)における距離減衰式をトレンド成分として、観測値との残差を平均値0の正規確率場と仮定してSimple Kriging法により補間した推定PGV分布を使用する<sup>17)</sup>。地盤増幅度は、松岡ら<sup>21)</sup>の深さ30mまでの地盤の平均S波速度(AVS<sub>30</sub>)と藤本・翠川<sup>22)</sup>の関係式を用いて換算した値を使用した。地震動分布の推定にあたり、気象庁、防災科学技術研究所、NEXCO東日本などの61観測記録を使用している<sup>23)</sup>。

図-5に、柏崎市における配水管実被害率と本研究による推定被害率を比較する。図-3によると新潟県中越沖地震における柏崎市全体の被害率は、構築された標準被害率曲線によって良好に推定されるはずである。しかしながら、250mメッシュで詳細に被害率の分布状況を比較すると違いが見られる。例えば、DIPの実被害率は2.0-5.0件/kmを示しているメッ

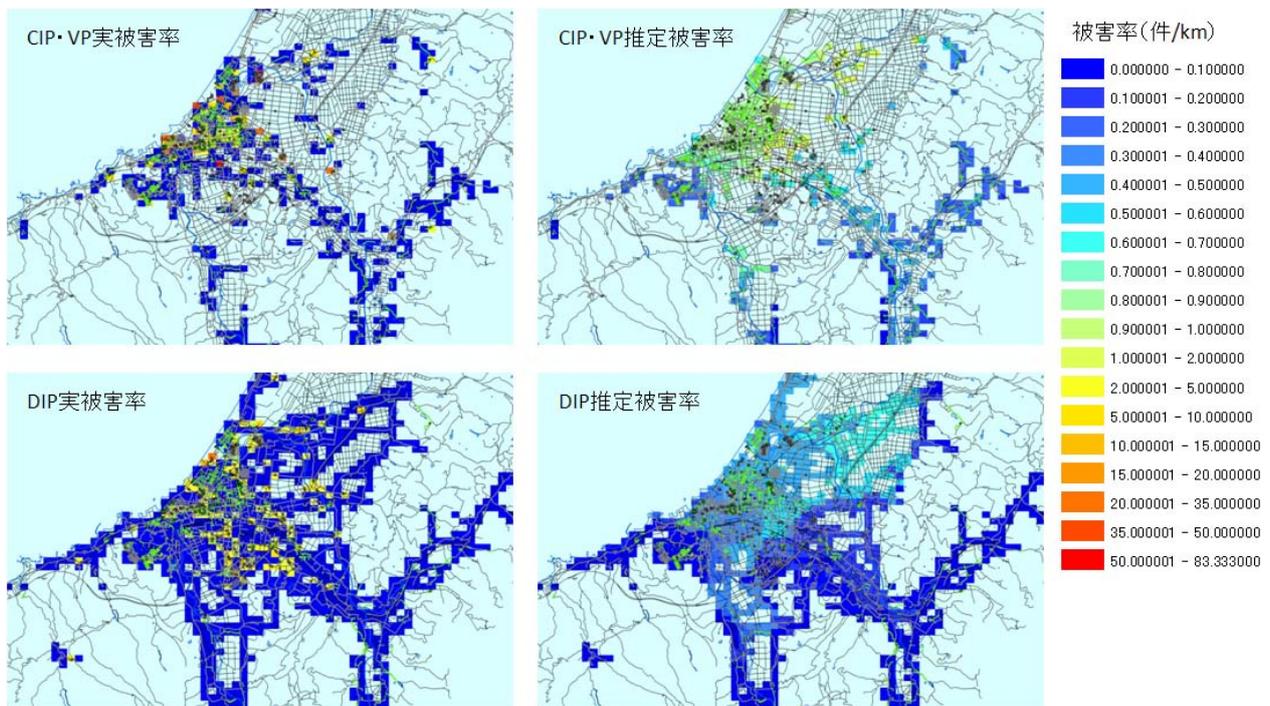


図-5 柏崎市の新潟県中越沖地震における配水管実被害率と推定被害率の比較

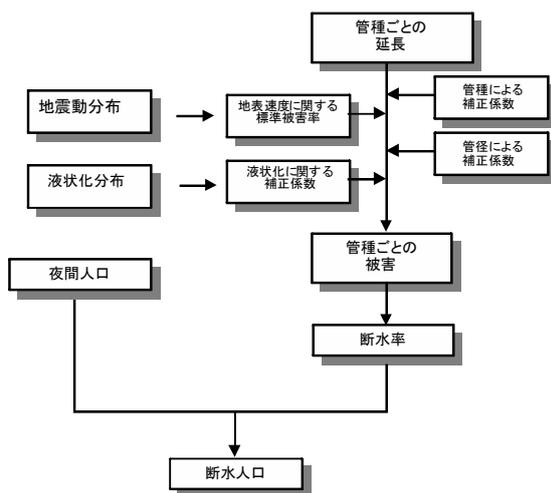


図-6 断水人口の推定フロー<sup>2)</sup>  
(中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会)

シュがいくつか見られるが、標準被害率曲線の推定結果は0.4-0.7件/kmのメッシュが柏崎市内中心部に広く分布している。このような実被害率の詳細な検討を行うには、管径係数、地盤係数、液状化係数など種々の補正係数を見直し、乗じる必要があるものと考えられ今後の課題である。一方で、とくにDIPに関しては、実被害が生じているメッシュの空間的な広がりとして推定被害率が0.2件/km以上を示しているメッシュの空間的な広がりにはほぼ対応しており、本研究が目的としたマクロな被害状況の把握という点は、達成できているものと考えられる。

## (2) 千葉県の配水管被害シミュレーション

千葉県では、昭和59年、平成8年に地震被害想定

表-6 配水管の管種・管径別補正係数<sup>2)</sup>

管種・管径	φ75mm以下	φ100-150mm	φ200-450mm	φ500mm以上
DIP	0.6		0.3	0.09
CIP	1.7	1.2	0.8 <sup>※3</sup>	0.4
SP <sup>※1</sup>	0.84	0.42	0.36 <sup>※3</sup>	0.24
VP	1.5		1.2	
ACP <sup>※2</sup>	6.9	2.7	2.0 <sup>※3</sup>	1.2
その他			0.3	

※1 鋼管

※2 石綿セメント管

※3 中央防災会議の値を修正して使用

結果を公表し、一般住民の地震防災対策への啓蒙、自治体の防災計画の立案などに役立てている<sup>24)</sup>。その後、日本で数々の被害地震が発生している現状と社会情勢が刻々と変化していることをふまえて、平成20年3月に第三期地震被害想定結果をとりまとめ公表している。本研究では、この際に用いられた千葉県の250mメッシュデータを用いて、東京湾北部地震(M<sub>JMA</sub> = 7.3)が発生した場合の配水管被害シミュレーションを行った。

千葉県の地震被害想定調査<sup>24)</sup>では、配水管被害率を日本水道協会が提唱する方法<sup>4)</sup>にのっとり推定している。すなわち標準被害率曲線としては磯山ら<sup>3)</sup>の式(3)が用いられている。そこで、本研究ではこの結果と比較するため、中央防災会議が被害推定に用いている手法<sup>2)</sup>により配水管被害率を推定する。

中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会では、東京湾北部地震が発生したときの配水管被害率を推定し、約1100万人が断水の影響を受けると被害を見積もっている<sup>25)</sup>。中央防災会議による断水人口推定

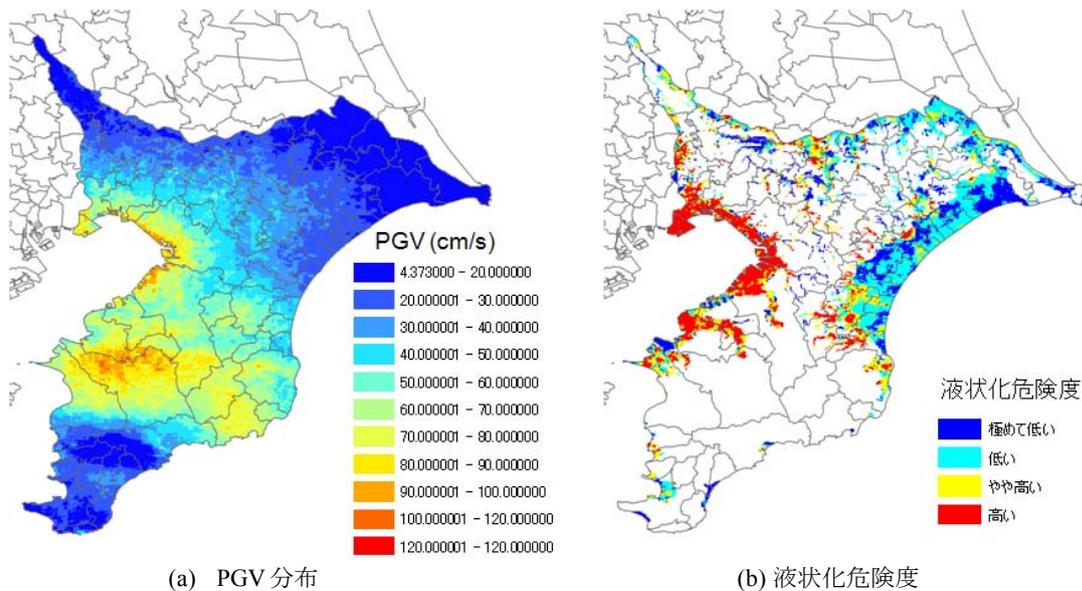


図-7 千葉県地震被害想定調査による東京湾北部地震のPGV分布と液状化危険度<sup>23)</sup>

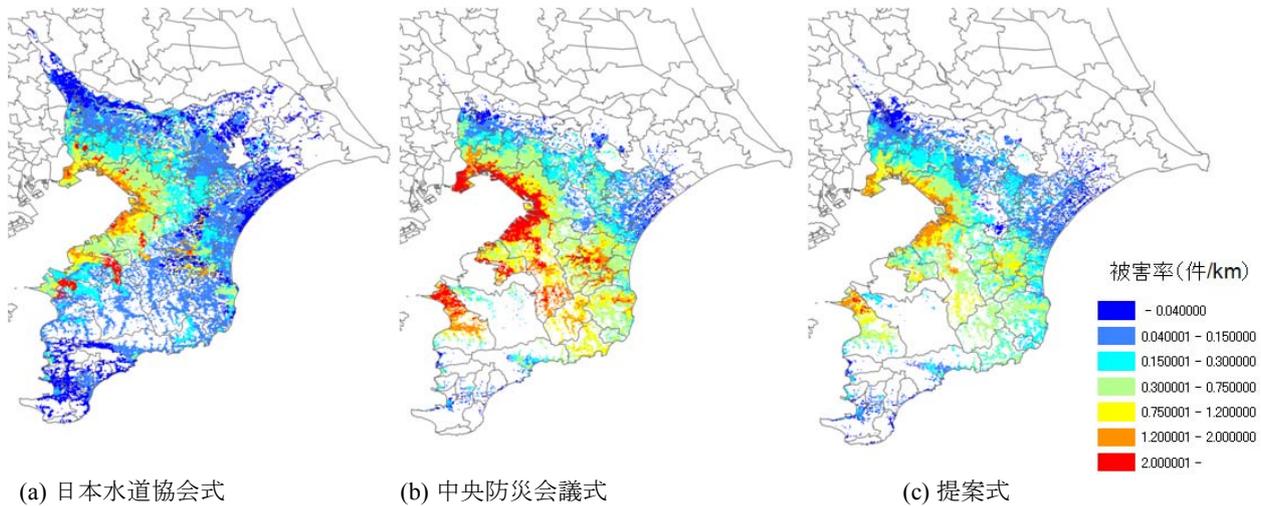


図-8 東京湾北部地震における配水管被害率の推定結果の比較

フローを図-6に示す。標準被害率曲線によって推定される被害率に管種、管径、液状化補正係数と管種ごとの配水管延長が乗じられることによって配水管被害率が見積もられる。標準被害率曲線には、山崎ら<sup>7)</sup>の式(4)が採用されている。

そこで、中央防災会議による手法のうち標準被害率曲線に山崎ら<sup>7)</sup>の式(4)と本研究の提案式を採用して、配水管被害率を比較する。また、千葉県の地震被害想定日本水道協会式によって見積もられた被害率も併せて比較する。表-6に本研究で使用した管種・管径別の補正係数を示す(CIPの標準被害率曲線が基準)。千葉県の250mメッシュデータにおける管径区分が中央防災会議がとりまとめた補正係数表と異なっているので、一部の補正係数は修正して用いた。修正の方法は、ここでは単純に隣り合う管径区間の平均値を使用することとした。なお、本研究の提案式を使用する場合は、DIPに関してはDIPの標準被害率曲線を使用し、管径のみの補正係数

(表-6のφ100-150mmを基準とした各補正係数の比)を乗じた。

地震動分布は千葉県の地震被害想定調査結果より、東京湾北部地震の結果(図-7(a))を用いる。液状化補正係数は同地震におけるPL値を用いた液状化判定結果(図-7(b))をもとに、液状化危険度が高い(PL>15)場合が2.4、液状化危険度がやや高い(5<PL≤15)場合が2.0、その他を1.0とした<sup>24)</sup>。

図-8に東京湾北部地震における配水管被害率推定結果を比較する。東京湾側の地域で大きな被害率が推定されるのは3つの標準被害率曲線で共通しているが、中央防災会議式のものが最も大きな被害率を予測している。日本水道協会が提唱する方法で推定された被害率(千葉県地震被害想定結果<sup>24)</sup>)と本研究の提案式を用いて推定された結果は大局的には近い被害率の分布状況を示しているが、両者を比較すると日本水道協会式の方が被害率2.0件/km以上を示しているメッシュが多く存在する。

本節で行った検討は、想定される地震に対する被害量の見積もりであるのでどの手法が正解に近いということは現状では判断の術がない。しかし、配水管被害率の予測式が兵庫県南部地震の被害事例のみに依存して構築されている状況を考えると、その後の被害地震データを取り入れて新たに標準被害率曲線を構築することは、単一の地震データによらないという点で望ましいものと考えられる。また、東京都防災会議地震部会が平成18年3月に公表している地震被害想定結果<sup>26)</sup>によると、多摩直下地震(M7.3)が発生した際の都市ガスの供給停止率が都内全域で0%と見積もられているのに対して、上水道の断水率は東部で40%以上が想定される地区も見られる。このことから、兵庫県南部地震のみのデータで構築された標準被害率曲線は配水管被害率をやや過大に推定する可能性が考えられ、近年の3地震を考慮した本提案式を使用することで改善につながるものと思われる。

## 5. 結論

本研究では、1995年兵庫県南部地震の配水管被害データに加えて、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震のデータを考慮して、マクロな配水管被害予測式を構築した。

被害が生じ始める地震動強さの下限值を設定すること、地震動強さが大きい範囲で被害率が指数関数的に増加せず被害率が頭打ちになる傾向を示すことの2点を表現できる関数形として、対数正規分布を用いた関数形を仮定した。これによって、地震動強さの下限值をある範囲に予め仮定することなどをせずに、非線形回帰によって定数を決定することができた。

構築された配水管の標準被害率曲線は、既往の研究のものとは比べて小さな被害率を予測する傾向にある。近年の地震における被害データの影響を統計的に考慮した予測式であるので、単一の被害データのみによらない点で、提案式の方が望ましいものと考えられる。また、近年の地震被害想定の結果を見ると、上水道管の推定被害率はやや過大であるように見受けられる場合もあるので、本提案式はこの点の見直しにも効果があると思われる。

今後の課題としては、配水管の被害予測に用いられる各種補正係数が兵庫県南部地震における芦屋市、西宮市の被害データのみから決定されているので、改善が必要である。また、標準被害率曲線として用いられているCIPの敷設延長は全国的に見ても長くないので、例えば十分に延長が長いDIPの被害率曲線を基準にすると、より信頼性の高い補正係数が得られるのではないかと考えられる。

## 参考文献

1) 梶秀樹, 塚越功: 都市防災学, 学芸出版社, 2007.

- 2) 内閣府(防災担当): 首都直下地震に係る被害想定手法について, [http:// www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/15/shiryu3.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/shutochokka/15/shiryu3.pdf)
- 3) 磯山龍二, 石田栄介, 湯根清二, 白水暢: 水道管路の地震被害予測に関する研究, 水道協会雑誌, 第761, pp.25-40, 1998.
- 4) (社)日本水道協会: 地震による水道管路の被害予測, 1998.
- 5) 磯山龍二, 片山恒雄: 大規模水道システムの地震時信頼度評価法, 土木学会論文報告集, Vol. 321, pp. 37-48, 1982.
- 6) 国土庁防災局震災対策課: 平成8年度南関東地域直下の地震被害想定手法検討調査, 1997.
- 7) 東京都: 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, 1997.
- 8) 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, Vol. 70, No. 3, pp. 21-37, 2001.
- 9) 石田栄介, 石井晃, 中村孝明, 磯山龍二: リアルタイム地震防災で活用される被害推定技術の現状, リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 土木学会, Vol. 2, pp. 67-72, 2000.
- 10) 村上貴志, 宮崎博明, 小松良光: 水道管路被害予測の高精度化に向けた検討, 日本地震工学会・大会-2007梗概集, pp. 380-381, 2007.
- 11) 三津谷維基, 坂上貴士, 細川直行: 兵庫県南部地震の被害実績に基づく低圧ガス導管網の被害予測, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 1250-1253, 2006.
- 12) 厚生労働省健康局水道課: 新潟県中越地震水道被害調査報告書, <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/topics/niigata/index.html>
- 13) (社)日本水道協会: 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震水道施設被害等調査報告書, [http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/houkokusyo\\_08.html](http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/houkokusyo_08.html)
- 14) (社)日本水道協会: 平成19年(2007年)能登半島地震水道施設被害等調査報告書, [http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/houkokusyo\\_07.html](http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/houkokusyo_07.html)
- 15) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759 / I-67, pp.213-232, 2004.
- 16) Karim, K. R., Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol31, pp1191-1212, 2002.
- 17) 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之: 新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集A, Vol. 64, No. 2, pp. 208-216, 2008.
- 18) 能島暢呂: 脆弱性指標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.
- 19) Ansary, M. A., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Statistical Analysis of Peaks and Directivity of Earthquake Ground Motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24, pp.1527-1539, 1995.11
- 20) 新潟大学災害復興科学センター: 災害支援電子地図

- ポータル, <http://emc.nhdr.niigata-u.ac.jp/>
- 21) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.
  - 22) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
  - 23) 土木学会地震工学委員会: 観測地震記録ダウンロードサイト, <http://download.jsce.or.jp/>
  - 24) 千葉県: 平成19年度 千葉県地震被害想定調査報告書, [http://www.pref.chiba.lg.jp/syozoku/a\\_bousai/jishin/higaisouteihoukoku.html](http://www.pref.chiba.lg.jp/syozoku/a_bousai/jishin/higaisouteihoukoku.html)
  - 25) 中央防災会議首都直下地震対策専門委員会: 首都直下地震対策専門調査会報告, 2005.
  - 26) 東京都防災会議地震部会: 首都直下地震による東京の被害想定(最終報告), II資料編, 2006.

## ESTIMATION OF DAMAGE RATIO OF WATER DISTRIBUTION PIPE BASED ON RECENT EARTHQUAKE DAMAGE DATA

Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

Evaluation of damage ratio of water distribution pipes against coming earthquakes is performed by various governmental organizations. The relationship between the peak ground velocity and damage ratio of water pipes was derived only from the damage dataset from the 1995 Kobe earthquake. Water pipes were seriously damaged during recent earthquakes and the damage datasets after these events are available to construct fragility curves. This study proposes the fragility curves for water distribution pipes and they are applied to simulate the damage distribution of water pipes affected by the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake and the water pipe damages in Chiba Prefecture due to the scenario Tokyo Metropolitan Earthquake.