

水道管路の地震時被害軽減化事業の評価

塚本博之¹・石田栄介²・磯山龍二³・山下徳正⁴・岡本和也⁵

¹日本技術開発株式会社 パブリックマネジメント事業部 ライフライン耐震・保全部
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: tsukamotohi@jecc.co.jp

²日本技術開発株式会社 パブリックマネジメント事業部 ライフライン耐震・保全部
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: isidae@jecc.co.jp

³日本技術開発株式会社 執行役員 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: isoyama@jecc.co.jp

⁴芦屋市役所 水道部 工務課 (〒659-8501 兵庫県芦屋市精道町7-6)

E-mail: yamashita.n@city.ashiya.hyogo.jp

⁵芦屋市役所 水道部 工務課 (〒659-8501 兵庫県芦屋市精道町7-6)

E-mail: okamoto.k@city.ashiya.hyogo.jp

戦後最大の惨事となった、阪神・淡路大震災から10年という節目の年を迎えた。この10年の間にも、日本の各地で被害地震は発生しており、水道施設も被害を受けている。地震に対する備えとして、事前対策として耐震化を図っておくことは重要であるが、特に管路はその物量が相当なものである等から、事業化するにあたって難しい側面を持つ。そのため、本検討では、水道管路を対象とした、地震被害推定シミュレーションに基づく耐震化事業の評価方法について示す。また、芦屋市の水道管路を対象とした適用事例を示す。

Key Words : 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake, water supply pipelines, seismic damage estimation, project evaluation, ashiya city

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、人口密集した都市部に発生した未曾有の直下型地震となったため、道路や家屋の他に、水道、ガス、通信、下水道等のライフラインも多大な被害が発生した。死者6,400余名、負傷者43,700余名を上る戦後最大の惨事となったこの阪神・淡路大震災は、我が国の震災対策を推進していく上で幾つもの大きな課題を残した。

阪神・淡路大震災における水道施設の被害は、取水、導水、浄水、送配水と多岐に渡った。最も被害が大きかったのは管路施設であり、広範囲で甚大な被害が生じたため、多量の漏水により短時間で管内の水が無くなり、水圧が上がらず、漏水箇所の特定が困難な原因となり、長期間に渡る断水が生じた¹⁾。

一方、阪神・淡路大震災を経て、2005年1月17日で10年という節目の年を迎えた。この10年の間にも、日本の各地で被害地震は発生しており、水道施設も被害を受けている。水道施設は都市供給システムを

構成する主要なライフラインであり、地震時においてもその機能の可能な限りの保持、及び早期復旧が緊要な課題となっている。

地震に対する備えとして、事前対策として耐震化を図っておくことは重要であるが、特に管路はその物量が相当なものである等から、事業化するにあたって難しい側面を持つ。

以上の背景を踏まえ、本検討では、水道管路を対象とした、地震被害推定シミュレーションに基づく耐震化事業の評価方法について示す。また、芦屋市の水道管路を対象とした適用事例を示す。

2. 耐震化事業の評価方法について

(1) 評価フロー

図-1に、水道管路を対象とした、地震被害推定シミュレーションに基づく耐震化事業の評価フローを示す。まず、現在の管路の情報を整備しておき、比較対象となる今後の耐震化計画に基づく管路を整備

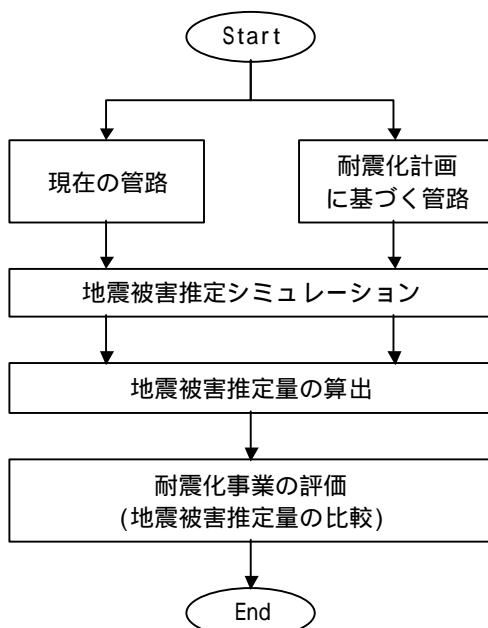


図-1 耐震化事業の評価フロー

する。次に、各々の管路に対し、地震被害推定シミュレーションを行い、後述する地震被害推定量を算出する。更には、各々の当該地震被害推定量を比較することにより、耐震化事業の評価を行う。

なお、今後の耐震化計画の評価だけでなく、これまでの耐震化事業に対する評価を行う場合は、例えば、1995年当時の管路情報等も整備しておく。

(2) 整備データ

表-1に、地震被害推定シミュレーションを行うにあたり、必要となるデータの一覧を示す。

管路情報については、マッピングデータ等のデジタルデータを活用することとなる。デジタルデータとして整備されていない場合は、管内図をトレースして平面位置座標を取得し、当該データに管種・管径の情報を付与することとなる。

統計情報については、各所管の事業年報等から取得することとなる。地区別等の詳細な情報が無い場合は、国勢調査等の人口等で代用することができる²⁾。

想定地震情報については、県や市が想定している地震動(地表面最大加速度)や液状化危険度を用いることとなる。一般的な自治体の被害想定では、約500m×500mメッシュのデジタルデータとして整備されていることが多い。

地形情報については、なるべく詳細な情報が望まれる。これは、水道管路の被害は、埋設されている地形・地盤に大きく影響することによる。自治体の被害想定で用いられた地形分類を用いる場合が多いが、ボーリングデータにまで立ち戻って地形分類を行う場合もある。今後は、デジタルデータでの公開が予定されている、防災工学や地震工学分野での利用を前提とした日本全国地形・地盤分類メッシュマップの活用も考えられる³⁾⁻⁴⁾。

表-1 整備データの一覧

種別	内容	備考
管路情報	・現在の管路 ・耐震化計画に基づく管路	平面位置、管種、管径、延長
統計情報	・給水人口 ・給水戸数	-
想定地震情報	・想定地震動(地表面最大加速度) ・液状化危険度	想定地震により変化
地形情報	・地形分類	-

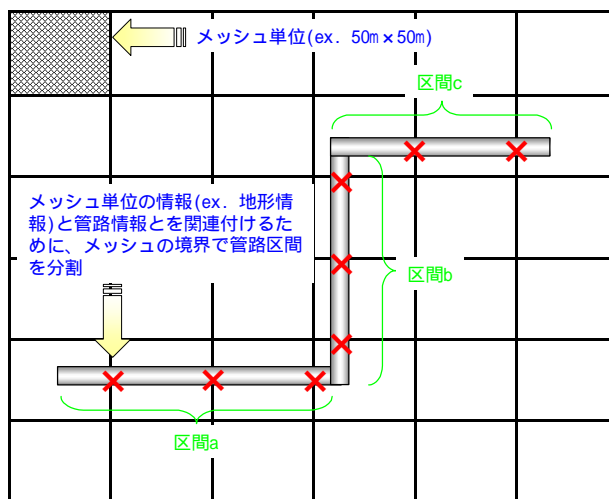


図-2 メッシュ単位の情報と管路情報との関連付け

(3) 地震被害推定シミュレーション

地震被害推定シミュレーションを行うにあたっては、ライン形状で表現されている管路と、メッシュ等で表現されている情報(想定地震動、液状化危険度、地形分類)とを関連付ける必要がある。

図-2に示すように、メッシュの境界で管路区間を分割(細分化)することにより、細分化された区間とメッシュとを簡単に関連付けることができるとともに、きめ細やかなシミュレーションが行える。

すなわち、着目管路区間の管路情報とその他の情報(想定地震動、液状化危険度、地形分類)をテーブル化しておき、被害推定式に適用することにより、地震被害推定シミュレーションは行える。

(4) 地震被害推定量

地震時の水道被害の規模を表現するものとして、本検討では、過去の地震での被害統計から導き出された被害率、被害箇所数、断水率、復旧日数の被害推定式に着目した。

前述のように、整備データを各管路区間でテーブル化しておくことにより、以下の式により地震時の被害推定量を算出することができる。

a) 被害率・被害箇所数

(社)日本水道協会の阪神・淡路大震災の被害分析結果をベースに、芦屋市・西宮市において詳細な被害分析を行い提案された、磯山らによる下式を用いる⁵⁾。

同式の $R_m(\alpha)$ が被害率であり、 $N(\alpha)$ が被害箇所

表-2 管種の補正係数

管種	補正係数	管種	補正係数
DIP	0.30	DIP(耐震継手)	0.03
CIP	1.00	PE	0.03
VP	1.00	不明	1.00
SP	0.30		

表-4 地形の補正係数

地形	補正係数	地形	補正係数
改变山地	1.1	沖積平地	1.0
段丘	1.5	その他	0.4
谷・旧水部	3.2	埋立地	1.0

表-3 管径の補正係数

管径	補正係数	管径	補正係数
0 75	1.6	150 < 450	0.8
75 < 150	1.0	450 <	0.5

表-5 液状化の補正係数

液状化	補正係数	液状化	補正係数
なし (沖積平地)	1.0	なし (埋立地)	1.0
部分的(沖積平地)	2.0	部分的(埋立地)	2.7
全体的(沖積平地)	2.4	全体的(埋立地)	4.0

管種	DIP(0.3)		CIP(1.0)	
管径	450(0.8)		150(1.0)	
	延長10[km]			
地形	改变山地(1.1)		沖積平地(1.0)	
液状化	なし(1.0)		部分的(2.0)	全体的(2.4)
地表面最大 加速度 [gal]	400[0.218]		600[0.598]	
被害率 [箇所/km]	0.3×0.8×1.1×1.0×0.218 = 0.058	0.3×1.0×1.0×2.0 ×0.598 = 0.359	1.0×1.0× 1.0×2.0× 0.598 = 1.196	1.0×1.0×1.0×2.4×0.598 = 1.435
延長 [km]	3.0	2.5	1.2	3.3
被害箇所数 [箇所]	0.058×3.0 = 0.174	0.359×2.5 = 0.898	1.196×1.2 = 1.435	1.435×3.3 = 4.736
総被害箇所数 [箇所]	0.174 + 0.898 + 1.435 + 4.736 = 7.243			

()内の数字は、補正係数値を示す。[]内の数字は、標準被害率[箇所/km]を示す。

図-3 管路に沿った(管路区間単位の)被害率・被害箇所数の計算例

$$R_m(\alpha) = C_p \cdot C_d \cdot C_g \cdot C_l \cdot R(\alpha)$$

$$R(\alpha) = 2.88 \cdot 10^{-6} \cdot (\alpha - 100)^{1.97} \quad (1)$$

$$N(\alpha) = R_m(\alpha) \cdot L$$

数である。α(>100)は、地表面最大加速度を意味し、Lは、各管路区間の延長を意味する。また、C_p, C_d, C_g, C_lは、それぞれ、管種、管径、地形、液状化の補正係数を意味し、表-2~表-5の値を用いる。

なお、表-2~表-5の補正係数については、文献5)等を参考に、後述する芦屋市に適用した例である。他の地域で適用する場合には、特性を吟味し、値を調整する必要がある。

図-3に計算例を示す。同図に示すように、管路に沿って、区間毎に管種、管径、地形、液状化危険度、地表面最大加速度の情報を整理し、該当する補正係数値(管種、管径、地形、液状化)、ならびに地表面最大加速度から、各管路区間の被害率を計算する。

さらには、当該被害率に各管路区間の延長を掛けることにより、被害箇所数を計算する。

b) 断水率

断水率については、川上による下式を用いる⁶⁾。断水率は、被害率xの関数として定義されており、式(1)で求めた被害率の値を用いることで計算できる。

$$y = 1 / (1 + 0.307x^{-1.17}) \quad (2)$$

c) 復旧日数

復旧日数については、高田らによる下式を用いる⁷⁾。復旧日数は、事業規模(1kmあたりの給水戸数)x₁と被害率x₂の関数として定義されている。事業規模は、給水戸数を延長で割ることにより求めることができ、さらには式(1)で求めた被害率の値を用いることで復旧日数は計算できる。

$$Day_{90} = 0.38 \cdot x_1^{0.86} \cdot x_2^{0.59} \quad (3)$$

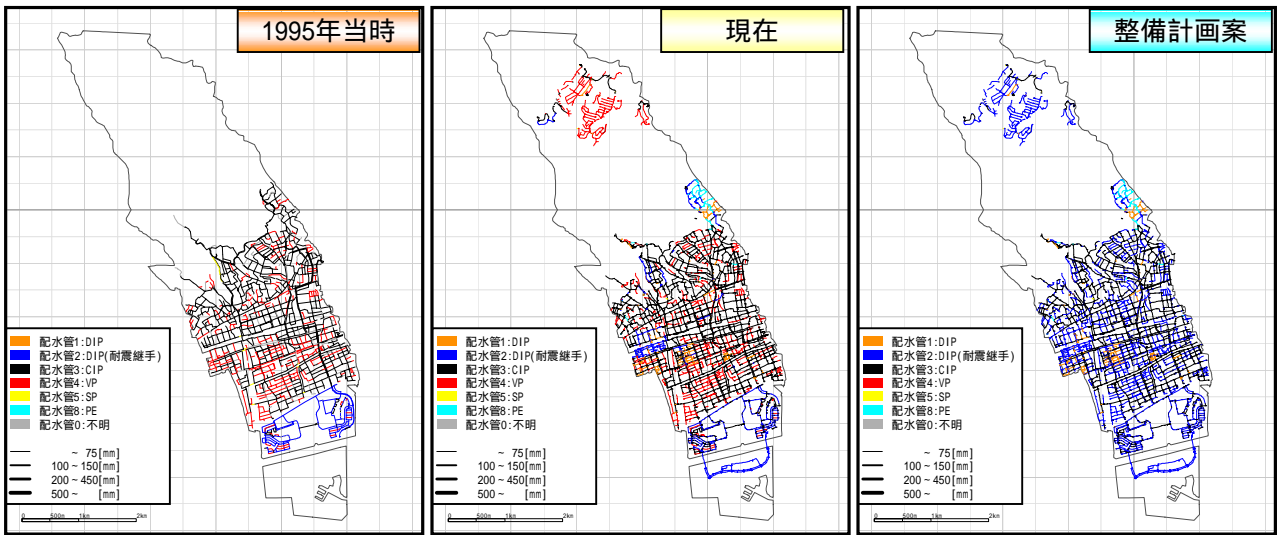


図-4 耐震化事業の比較対象管路

3. 芦屋市における具体的な事例

ここでは、芦屋市の水道管路を対象とした適用事例を示す。

(1) 耐震化事業の比較対象

図-4に示すように、阪神・淡路大震災から10年が経過したこともあり、これまでの耐震化事業の総括も含めて、1995年当時の管路(1995年当時)、現在の管路(現在)、耐震化事業に基づく管路(整備計画案)の3種類の管路を対象とした。

これにより、これまでの耐震化実施による効果、今後の耐震化計画による効果を見ることが出来る。なお、耐震化事業に基づく管路(整備計画案)については、現在の管路をベースに、耐震化を計画している合計約60kmの铸铁管とビニール管をダクタイル铸铁管(耐震継手)に更新したものとしている。

(2) 想定地震と地形分類

兵庫県では、平成10年度に地震被害推定調査を行っており、表-6、図-5に示すように5つの地震を想定している⁸⁾⁻⁹⁾。なお、想定地震動、液状化危険度は、約500m×500mメッシュで評価されている。

当該5想定地震と、兵庫県南部地震の再来の計6地震を対象とした。なお、兵庫県南部地震の再来については、地震動データについては、山口らが、建設省建築研究所が数値化した低層建築物の被害データ及び17地点の地震記録を用いて、町丁目単位での地震動分布の推定したものをを用いた¹⁰⁾。一方、液状化危険度については、Hamadaらが作成した約250m×250mメッシュ単位のものを用いた¹¹⁾。

水道管路の被害は、埋設されている地形・地盤に大きく影響するため、なるべく詳細な情報が望まれる。芦屋市の場合、1/25,000土地条件図が存在していたため、デジタル化を行い活用した。なお、谷筋が表現できるよう、約50m×50mメッシュのデータとしている。

表-6 兵庫県の想定地震の諸元⁸⁾⁻⁹⁾

想定地震	マグニチュード	走向 [度]	傾斜 [度]	長さ [km]	幅 [km]	深さ [km]
有馬高槻構造線～六甲断層帯地震	7.7	N30E	90	53	—	0
		N50E	90	25	—	0
山崎断層地震	7.7	N60W	90	51	—	0
		N30W	90	19	—	0
中央構造線地震	8.0	N70E	90	79	—	0
日本海沿岸地震	7.3	N15E	90	10	—	0
南海道地震	8.4	N20E	160	150	120	1
		N20E	170	150	30	10

(注) 走向は、平均的な走向、想定に異なる場合は「—」を記入している。

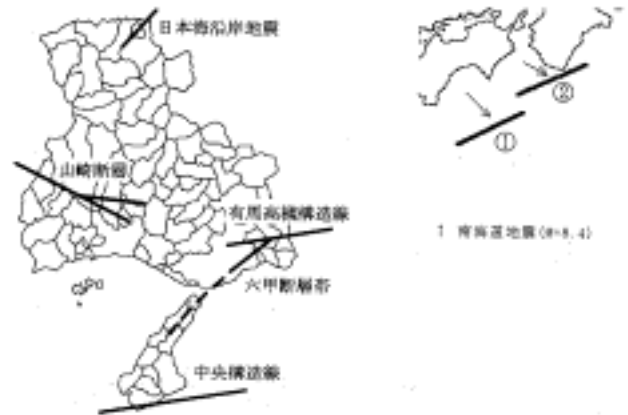


図-5 兵庫県の想定地震の断層位置⁸⁾⁻⁹⁾

(3) 耐震化事業の評価

1995年当時の管路(1995年当時)、現在の管路(現在)、耐震化事業に基づく管路(整備計画案)の3種類の管路を対象に、地震被害推定シミュレーションを行い、地震被害推定量を算出した。また、当該地震被害推定量を基に、耐震化事業の実施(計画)に伴う地震被害軽減量から、耐震化事業の評価を行った。

図-6に、例として管路区間単位の被害率(有馬高槻構造線～六甲断層帯地震)の分布図を示す。また、

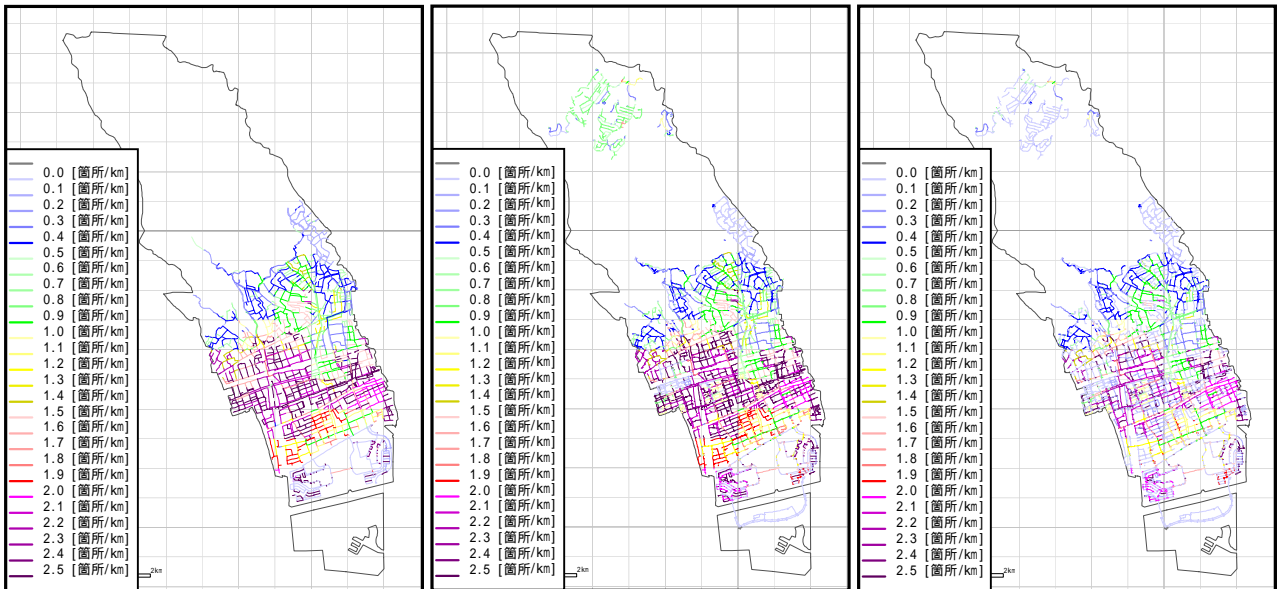


図-6 被害率(有馬高構造線～六甲断層帯地震)

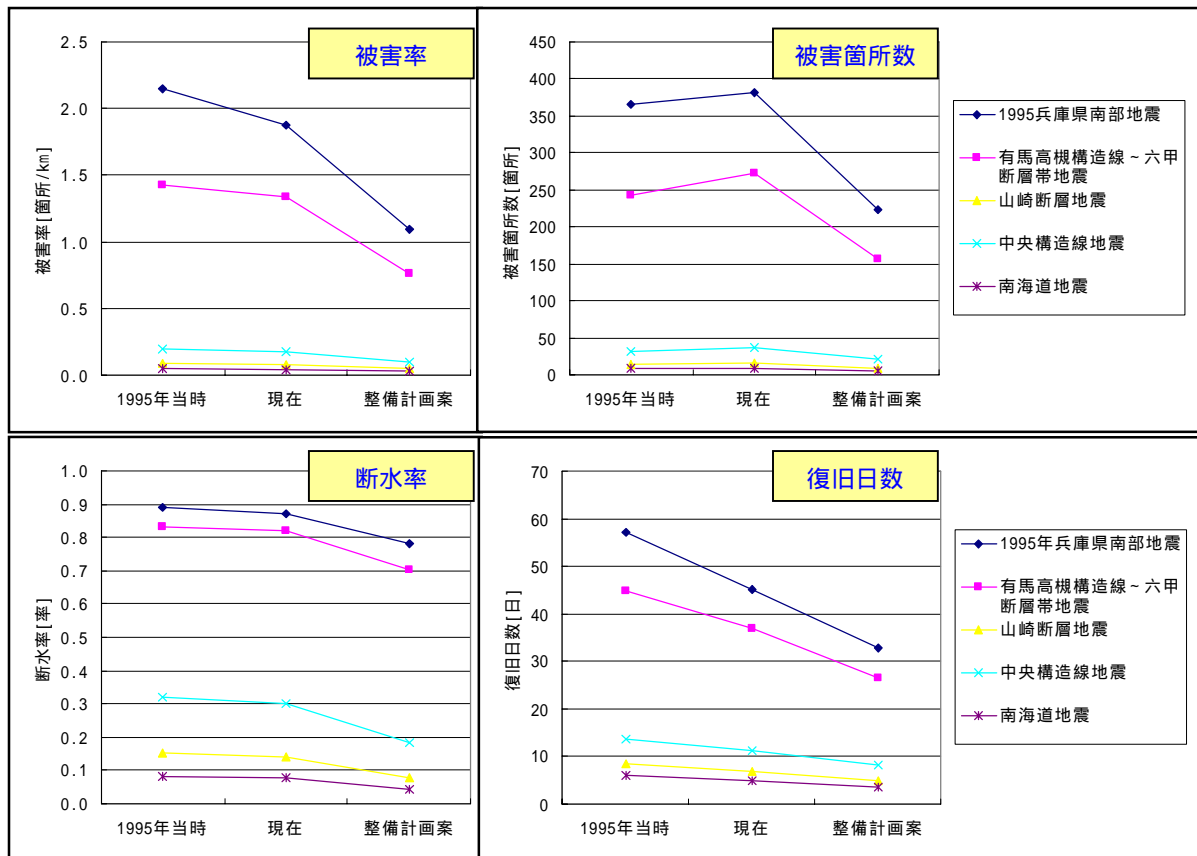


図-7 耐震化事業の評価

図-7に、耐震化事業の評価を行うため、地震被害推定量(被害率、被害箇所数、断水率、復旧日数)の比較図を示す。

以下に、評価結果を列挙する。

- 1995年当時の管路と現在の管路とを比較した場合(これまでの耐震化事業の実施)、被害率、断水率ともに、ほんの少しの減少に留まっている。
- 一方、被害箇所数の微増、ならびに復旧日数の減少は、1995年当時より管路延長が伸びたことに起因する。すなわち、管路延長が伸びたため

(地震被害を受ける可能性のある対象物が増えたため)、被害箇所数が増加している。また、管路延長が伸びたことにより、配水管1kmあたりの給水人口が減少し、それに伴い、復旧日数が減少することとなった。

- しかし、総合的に見て、1995年当時の管路と現在の管路とを比較すると、耐震化がそれほど進んでいないことが分かる。
- 一方、現在の管路と整備計画案の管路とを比較した場合(今後の耐震化事業計画)、全ての被害

推定量で大幅に減少している。すなわち、地震時における水供給機能の可能な限りの保持、及び早期復旧に向けて大きく貢献することが期待できる。

- ・現在の管路と比較して、被害率、被害箇所数は、約58%程度に減少している。復旧日数は約72%となっている。これらは、想定地震に依らない。
- ・一方、断水率については、想定地震に大きく依存し、約55%～90%となっている。これは、被害率が約1[箇所/km]以下の場合、急激に減少する非線形関数となっているためである。
- ・被害率、被害箇所数を見るに、芦屋市として特に注意を要する想定地震としては、兵庫県南部地震の再来、有馬高槻～六甲断層帯地震、中央構造線地震であることが分かった。
- ・切迫性が危惧されている東南海・南海(県の想定では南海道地震)が、特に注意を要する地震ではない結果となっている。
- ・整備計画案では、今後約60kmの耐震化を計画しているが、膨大な費用になること、相当数の年月がかかることが予想され、地震により被害を受ける可能性の高い管路区間から、効率的に耐震化を行っていくことが重要となる。
- ・すなわち、効率的・効果的に耐震化事業を行っていくためには、本検討で算出した、管路区間単位での被害率等は有効な情報となりえる。

4. おわりに

本検討では、水道管路を対象とした、地震被害推定シミュレーションに基づく耐震化事業の評価方法を示すとともに、芦屋市の水道管路を対象とした適用事例を示した。

過去の地震での被害統計から導き出された地震被害推定量(被害率、被害箇所数、断水率、復旧日数)は、被害規模を掴むものとして、簡便でかつ適当な指標と考えている。芦屋市への適用事例で示したように、地震被害の規模等をイメージアップでき、かつ具体的な数値により、例えば、復旧日数を 日以内に抑えるための事業規模はどの程度かといった検討も可能である。

昨今の財政難の中では、耐震化事業に限らず事業化にあたっては具体的な数値等による、説明責任が特に問われている。当該課題をクリアーにしていく一つのアプローチとして十分有効かつ簡便な手法であり、広く活用されることを期待したい。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 ライフライン施設の被害と復旧、1995.9.10.
- 2) 総務省統計局：統計GISプラザ、平成12年国勢調査町丁・字等別集計データ、(<http://gisplaza.stat.go.jp/GISPlaza/>)
- 3) 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, 2004.4.
- 4) 若松加寿江、松岡昌志：大都市圏を対象とした地形・地盤分類250mメッシュマップの構築、第27回地震工学研究発表会講演論文集、CD-ROM, ID50, 4p, 2003.12.
- 5) 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67巻、第2号(第761号)、pp.25-40, 1998.2.
- 6) 川上 英二：埋設ライフラインの震害例と耐震設計 =物的被害と機能支障=、日本工業出版「配管技術」第38巻第6号、1996.5.
- 7) 高田 至郎、原山 絵巳子、今西 立彦：水・ガス供給システムの復旧日数予測式とその検証、建設工学研究所論文報告集第45号 [論文]、2003.11.
- 8) 兵庫県：兵庫県地震被害想定調査報告書、1999.3.
- 9) 兵庫県：フェニックス防災システム ハザードマップ、(<http://web.bosai.pref.hyogo.jp/hazardmap/index.htm>)
- 10) 山口 直也、山崎 文雄：兵庫県南部地震の建物被害による地震動分布の推定、第10回日本地震工学シンポジウム、pp.3395-3400, 1998.11.
- 11) Masanori Hamada, Ryoji Isoyama, and Kazue Wakamatu : The 1995 Hyogoken-Nanbu(kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement and Soil Conditions in Hansin Area, (財)地震予知総合研究振興会、1997.8.

(2005. 6. 16 受付)