

震害要因とその経年的影響に基づく 上水道の耐震健全度評価

VULNERABILITY EVALUATION OF WATER SUPPLY SYSTEMS
BASED ON THE SEISMIC DAMAGE FACTOR AND LONG-TERM EFFECTS OF EARTHQUAKE

亀田弘行* 神田 仁** 杉戸真太***

By Hiroyuki KAMEDA, Hitoshi KANDA and Masata SUGITO

The earthquake damage of water supply pipelines is renewed and analyzed for a purpose of the development of methodologies for seismic integrity assessment of the water supply systems. Formulas are developed for estimation of the probability of pipe failure and the conditional pipe failure rate. The long-term effects of earthquake damage are also analyzed on the basis of the data of system performance and repair works. On this basis, the earthquake vulnerability indices of water supply systems are proposed, and their implication with seismic integrity assessment are discussed.

1. 緒論

1978年宮城県沖地震により、仙台市を中心とした市町村の上水道システムが被害を受けた。その5年後、1983年日本海中部地震では能代市、男鹿市を中心とした市町村の上水道システムに被害が発生した。地震後の災害調査・研究により個々の都市の上水道管路破壊については分析が進められ、それぞれの被害の特徴が明らかにされたが、複数の上水道システムが受けた地震被害を比較し、総合的に論じた研究はこれまでは比較的少なかった。さらに、各都市の上水道システムは種々の地盤条件、管種、異なるシステム規模のもとで構成されているが、それらがどの程度の耐震健全度を有するかを評価する共通の指標が求められるようになってきているのが最近のすう勢である。そしてこのような耐震健全度を評価するためには、地震に対するシステムの脆弱性(vulnerability)評価において、地震直後の被害状況のみでなく、地震被害の影響が経年的に及ぶ様相についても考慮することが必要となろう。

以上のような観点から、本研究は上水道システムの耐震健全度評価法整備の第一歩として、以下のような研究を行ったものである。

まず、仙台市と能代市の上水道管路の地震被害データを再整理し、両都市で合わせて要因分析を行った。これにより両システムの被害の共通点を探るとともに、都市の条件毎の特殊性を明らかにし、共通性のある震害予測モデルを作成した。さらに、従来あまり注目されなかった震害の経年的影響について調査分析を行い、国内外の5都市について、地震被害が収束するまでを時間に沿って追跡・評価した。

これらの分析をもとに、上水道システムの耐震健全度評価の基礎となる「被災度指標」の提案を行い、

* 工博 京都大学教授 防災研究所都市施設耐震システム研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄)
 ** 工修 東海旅客鉄道(株)東海鉄道事業本部工務部 (〒450 名古屋市中区区名駅)
 *** 工博 京都大学助手 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

都市のおかれた諸条件をもとに、上水道システムが持つ耐震性を定量的に評価し比較する手法を試みた。

以上の分析により、既存の上水道システムの耐震強さを評価し、ひいては将来発生が予想される地震被害をある程度把握することが可能となり、震害予測、復旧戦略の策定及び耐震施策に対し有効な情報が提供できるものと期待される。

2. 地盤条件と管種を考慮した上水道管路の震害要因分析

本章では、1978年宮城県沖地震による仙台市上水道システムの管路被害と1983年日本海中部地震による能代市水道システムの管路被害を再整理し、震害要因による管路被害率の推定式を作成して、4.における健全度評価の基礎資料とする。これらの震害は異なる地震によるものであるが、両地震の震度とも気象庁震度階ではVと評価され、詳細な震度調査を行った研究報告^{1),2)}によると両者とも震度5.3とされている。従って本章で扱う管路被害は同程度の地震動強度のもとでもたらされたことを前提とする。

2.1 震害要因指標

水道管路の地震被害に影響を及ぼす要因として、①地盤パラメータ³⁾ S_n 、②管種、③人工的改変地盤である宅地造成地に位置するか否か、④地盤の液状化の4つを取り上げる。以下、4要因の意義を考察する。

①地盤パラメータ S_n 標準貫入試験から得られるN値を用いて次式で与えられる³⁾。

$$S_n = 0.264 \int_0^{d_s} \exp\{-0.04N(x)\} \cdot \exp(-0.14) dx - 0.885 \quad (1)$$

ここに、 $N(x)$ は深さ x (m)におけるN値； d_s はN値の得られている深さ

S_n 値は-0.6~-0.2の場合はよく締まった地盤、-0.2~0.6が通常の地盤条件、0.6~1.0は軟弱地盤に分類される。文献3)において、 S_n は地震動強度に対する地盤条件の影響を表す指標として定義されている。すなわち S_n の大小は地盤の軟硬を表すと同時に、地域内での相対的な地震動強度の大小に関連する。

②管種 配水管の管種は鑄鉄管(CIP)、ダクタイル鑄鉄管(DCIP)、石綿管(ACP)、塩化ビニール管(VP)、鋼管(SP)などが用いられる。この中でCIP、DCIPが優れた耐震性を有することが過去の震害調査で確かめられている⁴⁾。口径は50mm以上1000mm程度である。配水管の管種により耐震性に差があるため、これを説明変数に取り上げる。一方、公道下の配水管より分岐した各需要家の給水口までの引き込み設備を給水装置と総称し、給水管、止水栓、量水器などから構成される。

③宅造地 1978年宮城県沖地震による仙台市の被害報告では、緑ヶ丘、旭丘などの宅地造成地で多くの被害が発生した。造成後間もない宅造地では震動により盛土の沈下を来し、それに伴い管体が破損したと考えられる。宅造地の定義は必ずしも単純ではないが、本研究では宅地を造成する目的で人工的に改変した土地と規定することとし、具体的作業では仙台市の地形図上で住宅の並び、道路敷設状況などから判定した。

④液状化 1983年日本海中部地震による能代市の被害は、液状化現象と密接に関わっていることが確かめられた⁴⁾ためこの要因を取り上げる。しかし地盤が液状化したか否かは判定するのが難しいため、指標として噴砂状況を用いて区別した。地表で噴砂が認められた地域の面積がメッシュに占める割合により、LQ=2；全域、LQ=1；一部、LQ=0；無しの3ランクに分類した。

管路破壊予測のための震害要因という観点に立てば、液状化の発生を予測するための指標を用いるべきである。このため液状化ポテンシャル P_L を説明変数に用いた要因分析も試みた。詳細は文献6)に譲るが、液状化ポテンシャルと破壊発生確率、破壊率の間には明確な相関は見られなかった。 P_L は液状化の程度を概ね示すために提案された指標であり、メッシュデータとして使用した場合、細かな地域差が際立ち不都合が生じたと思われる。以上より、より信頼度の高い液状化予測指標の開発は将来の課題として、ここでは上記の噴砂状況を震害要因として用いた。

2. 2 メッシュデータ

メッシュ分割は、上水道配水管路図（1万分の1地形図に配水管の管種、口径を記したもの）上で行つた。仙台市を500m×500mに分割した総計1956個のメッシュのうち、配水管が布設されている657個のメッシュデータを使用した。能代市では市域を250m×250mに分割し、総計656個のメッシュ中、配水管が布設されている206個のデータを使用した。各メッシュごとに2.1の①～④の指標値を算出し、これを配水管破壊率と対応させて要因分析を行う。

2. 3 宮城県沖地震および日本海中部地震による震害データの分析

(1) 震害データの分析の方法

本研究では、管路破壊率の推定モデルを作成するにあたり、次式のような2段階の推定式を考えた。

$$\hat{r}_F = \hat{r}_F|F \times p(F) + 0 \times p(\bar{F}) \quad (2)$$

ここに、 $p(F)$ はあるメッシュで破壊が発生する確率、 $\hat{r}_F|F$ はあるメッシュで破壊があつたという条件下での破壊率を示す。

上水道管路破壊を要因分析する際に、管路が無破壊であるメッシュデータにおいては、破壊率=0.0という一定値であっても、そうした結果を生じた要因は様々に異なっており、高い耐震性を有する場合から辛うじて破壊を免れた場合までが考えられる。これらを一樣に扱うと推定の精度は低下するが、一方無破壊のデータを除外すると、破壊が生じた場合のみを対象とする議論になり全体の被害推定としては不十分である。式(2)のような2段階の推定を取り入れて、まず管路が破壊するか否かの確率を考え、次に破壊したときの条件付破壊率を考えることにより、精度の高い推定が可能になる。

式(2)において、破壊発生確率 $p(F)$ は次式で定義した。

$$p(F) = \frac{\text{管路破壊があつたメッシュ数}}{\text{管路破壊があつたメッシュ数} + \text{無破壊のメッシュ数}} \quad (3)$$

ここで破壊発生確率を求める際に、メッシュ内の管路延長がある長さ以下であると、破壊に至る条件の悪さがあつながら実際は破壊を免れる可能性がある。そこでメッシュ内の管路延長に対する破壊数を調べた結果、仙台市では管路長が800m未満のメッシュ、能代市では管路長が200m未満のメッシュでは管路破壊がほとんど生じていなかったため、この条件に該当するメッシュデータは解析から除外した。上記の境界値は仙台市と能代市のメッシュの面積比が4:1であることから、整合性の取れた値と考える。

式(2)の条件付破壊率 $\hat{r}_F|F$ については、メッシュ毎の破壊率にばらつきがあるため、平均値と標準偏差で表現する。

(2) 1978年宮城県沖地震による仙台市上水道管路の被害

図1は、文献5)の「仙台市水道給配水管被害分布図」から配水管被害箇所を特定し、メッシュ毎の管路延長を求めて算出した破壊率(=破壊件数/管路延長)を濃淡表示したものである。大別して2箇所破壊率が高くなっている。このうち北側が旭丘、中央部が緑ヶ丘の宅造地に対応する。

図2に、配水管の破壊率及び破壊発生確率に及ぼす地盤パラメータ S_n の影響を宅造地と非宅造地に分けて示した。横軸に S_n 、(a)は縦軸に破壊発生確率 $p(F)$ を、(b)は縦軸に破壊率を取り整理した。ここで図2(b)右上方の破壊率の平均値 μ 、標準偏差 σ は破壊率 > 0 なるメッシュから求めた値である。

図2(b)において、破壊率の高いメッシュの大半が宅造地に属している。そして、図2(a)においては、破壊発生確率と S_n が相関関係を持つことが分かる。非宅造地において、 $S_n < -0.5$ では $p(F) = 0$ であり、 $S_n > -0.5$ では S_n の増加とともに破壊発生確率もほぼ線形的に上昇している。すなわちこの範囲の S_n では、

地盤が軟弱なほど破壊が発生する確率が高くなることを示している。そして S_n が0.3を越えると破壊発生確率は頭打ちになる。一方宅造地では、 S_n の大小によらず $p(F)$ はほぼ一定値を取っている。以上の結果をまとめると、地盤破壊が生じない場所では管路の破壊発生確率は地盤の揺れ易さに支配される。宅造地のような地盤破壊が生じ易い場合は管路の破壊発生確率はもはや S_n とは無関係になる。

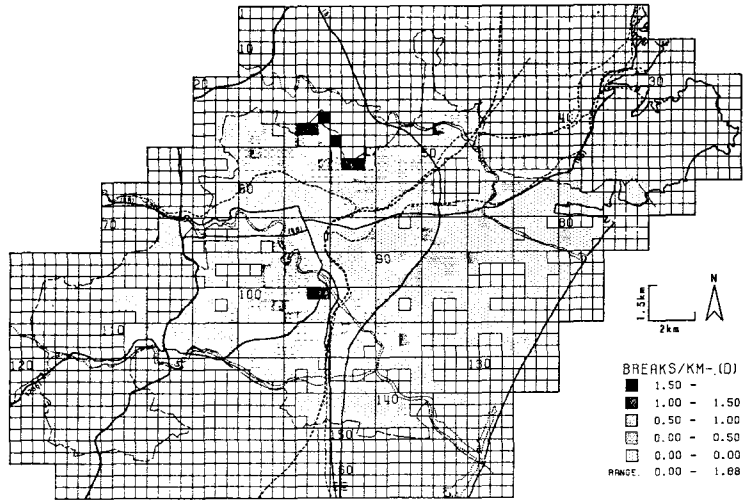


図1 仙台市 配水管破壊率の分布

(3)1983年日本海中部地震による能代市上水道管路の被害

能代市の上水道管路破壊箇所の特定は、震後の被害調査⁴⁾から得られた破壊箇所、管種、口径に関するデータを用いた。同じメッシュ内でもACP, VP, CIP・DCIPの破壊は別個のデータとして解析することも行つたが⁶⁾、ここでは仙台市の被害データと統一するため、(全管種での破壊件数の和/全管種の布設長の和)を配水管破壊率として採用した。図3(次頁)にこの破壊率の分布を示した。能代駅の西方と西南方向に広範囲に被害が発生している地域が見られ、いずれも噴砂現象が認められた地点である。

図4に配水管の破壊率と破壊発生確率に及ぼす S_n の影響を噴砂現象のランク毎に示した。噴砂の有無が不明の地域は解析から除外した。図4(b)において、破壊率の高いメッシュのほとんどが噴砂現象に関係している。噴砂の認められなかったメッシュでも破壊は生じたが、その平均値は小さく、ばらつきも小さい。

図4(a)においては、液状化による地盤破壊が生じなかった $LQ=0$ のメッシュで、仙台市の非宅造地の場合と同様に、破壊発生確率が地盤パラメータ S_n に依存する傾向が確かめられる。すなわち、 $S_n < -0.5$ では $p(F)=0$ であり、 $S_n \geq -0.5$ では S_n の増加とともに破壊発生確率もほぼ線形的に上昇し、 $S_n=0.3$ 付近で頭打

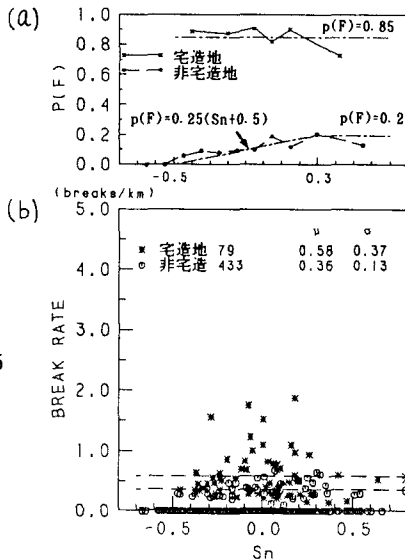


図2 仙台市 宅造地・非宅造地で分類した S_n v. s. 配水管破壊率, 破壊発生確率

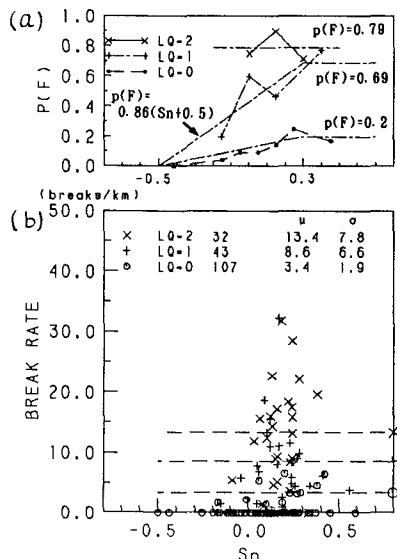


図4 能代市 噴砂現象の程度で分類した S_n v. s. 配水管破壊率, 破壊発生確率

ちになる。一方全域的に液状化が発生したLQ=2のメッシュでは、Snの大小によらずp(F)はほぼ一定値を取っている。以上のことから、地盤破壊が生じない場合の破壊発生確率は、仙台市と能代市でほぼ同程度、地盤の揺れやすさに支配されることが認められた。

2. 4 震害要因指標を考慮した管路被害推定式の構築

前節2. 3における分析結果から、(2)式の破壊発生確率、条件付破壊率は次のように表現できる。

$$\hat{r}_f = \hat{r}_f(LQ, CF, mp | F) \times p(F; Sn, LQ, CF) \quad (4)$$

ここに、LQは液状化、CFは宅造地、mpは管種を表す。

(a)破壊発生確率の推定

2.3(3)の考察により、破壊発生確率のSnへの依存性が、地盤破壊が生じた場合と生じなかった場合についてそれぞれ明らかにされた。これらを定式化したものが図2(a)、図4(a)及び表1(a)中に示した式である。

(b)条件付破壊率の推定

条件付破壊率 \hat{r}_f の推定は以下のように行った。図2(b)、図4(b)から、破壊率はばらつきが大きくSnとの相関も明確には表れていないため、Snに依存しない平均値で代表させる。式(4)第1項に示したように、液状化、宅造地、管種を説明変数にして要因分析を行う。

まず、LQ=0、CF=0すなわち地盤破壊が生じない場合を考える。この時、仙台市と能代市の条件の違いは式の上からは管種のみとなり、条件付破壊率の平均値(図2(b)、図4(b)中より)

$\mu=0.36$ (仙台)、 $\mu=3.4$ (能代)を説明するためには、次の等式が成立する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} 0.04a + 0.39v + 0.57m &= 0.36 \\ 0.46a + 0.44v + 0.10m &= 3.4 \end{aligned} \right\} (5)$$

ここで、a、v、mはACP、VP、Metal(CIP+DCIP+SP)のそれぞれの条件付破壊率、係数に用いた数値(0.04、0.39、0.57)は仙台市、(0.46、0.44、0.10)は能代市での管種比率(ACP、VP、Metal)である。但し、これは破壊が生じたメッシュのみについて管種比率を算出した。

しかし、式(5)の連立方程式は $a>0$ 、 $v>0$ 、 $m>0$ を同時に満たす解を持たない。このことは、仙台市と能代市の地盤破壊が生じなかった箇所での管路破壊状況は、管種だけでは説明できないことを意味する。例えば、仙台市の旧市街は新第三系鮮新統に属する仙台層群と呼ばれる安定地盤の上にあるが、能代市は大部分が米代川の沖積層と砂丘堆積物から成る。このことから、地盤条件をSnのみで表現することには限界があることも考えられる。しかしながら、宅造地と液状化の両方の影響を合わせてとり入れた管路破壊予測を行うため、仙台市、能代市の条件付破壊率の推定式を一本化する。

これには、1978年宮城県沖地震、1983年日本海中部地震、1987年千葉県東方沖地震で被災した上水道事業体の管路被害値をまとめた文献⁷⁾(表2)を用いて、これらの被害感度の平均値から一般的と考えられる管種ごとの被害感度を算出する方法を採用した。表2の値については、ACPとDCIPの被害感度は3地震と

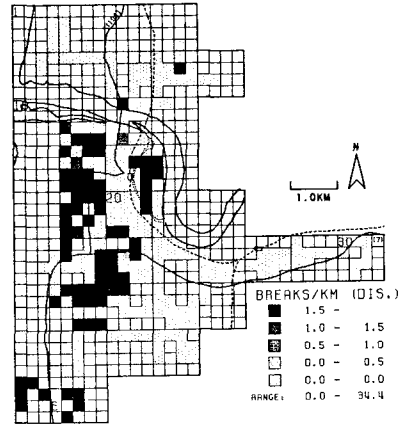


図3 能代市 配水管破壊率の分布

表1 破壊推定モデルの推定式

(a)破壊率の推定式	
$p(F Sn, 0, 0) =$	0.0 ($Sn < -0.5$)
	$0.25 \times (Sn + 0.5)$ ($-0.5 \leq Sn < 0.3$)
	0.20 ($0.3 \leq Sn$)
$p(F Sn, 1, 0) =$	0.0 ($Sn < -0.5$)
	$0.88 \times (Sn + 0.5)$ ($-0.5 \leq Sn < 0.3$)
	0.69 ($0.3 \leq Sn$)
$p(F Sn, 0, 1) = 0.85$	
$p(F Sn, 2, 0) = 0.79$	
(b)条件付破壊率の推定式	
$(ACP, VP, Metal) [DCIP+SP]$ 件/km	
$\hat{r}_f(0, 0 F) =$	(0.96, 1.32, 0.32)
$\hat{r}_f(0, 1 F) =$	(1.10, 1.48, 0.36)
$\hat{r}_f(1, 0 F) =$	(2.27, 3.08, 0.74)
$\hat{r}_f(2, 0 F) =$	(8.68, 4.92, 1.19)

もほぼ同程度だが、ACPとVPの破壊率に開きがあり、宮城県沖地震ではVPがACPの約1/2、日本海中部地震ではVPがACPの2倍以上を示している。この原因については、さらに分析を要する。

表2から得られた被害感度を用いて、仙台市で非宅造地では全管種での平均値が $\mu=0.36$ に等しくなるように、

$$1x \cdot 0.04 + 1.34x \cdot 0.39 + 0.32x \cdot 0.57 = 0.36 \quad (6)$$

を満たす x (ACPの条件付破壊率)を求めて、 $x=0.483$ 、すなわち $(ACP, VP, Metal) = (0.483, 0.645, 0.155 \text{件/km})$ と管種ごとの条件付破壊率を求めた。能代市で液状化が発生しなかった所も同様の方法により、

$$1x \cdot 0.46 + 1.34x \cdot 0.44 + 0.32x \cdot 0.10 = 3.4 \quad (7)$$

を解いて、 $(ACP, VP, Metal) = (2.90, 4.55, 0.81 \text{件/km})$ と求めた。そしてこれらを仙台と能代のデータ数で加重平均して

$$(ACP, VP, Metal) = (0.98, 1.32, 0.32 \text{件/km}) \quad (8)$$

が地盤破壊が無いメッシュでの管種ごとの条件付破壊率と定めた。

さらに、宅造地では図2(b)の μ より $[0.58/0.36=1.1]$ 、すなわち宅造地での条件付破壊率は地盤破壊の無い場合の1.1倍であると考え、液状化についても同様に図4(b)の μ より、 $LQ=2$ の場合は $[13.4/3.4=3.0]$ 、広範囲に液状化が発生した箇所での破壊率は地盤破壊の無い場合の3.0倍、 $LQ=1$ では $[8.6/3.4=2.3]$ 、同2.3倍と考えて、式(8)をもとにそれぞれの場合の管種別条件付破壊率を定めた。

以上、式(4)に基づく各破壊発生確率、条件付破壊率をまとめて表1(前頁)に示す。

これらの推定式を用いて、仙台市、能代市の被害を予測し、推定式の検証を行った結果が表3である。仙台市の実際の被害115件を214件、能代市の被害411件を120件と予測しており、破壊率の精度にはなお問題がある。しかしながら、式(4)で提案した2段階推定において、破壊発生確率をもとに破壊の危険性が高い地域を精度良く推定することが可能であることと合わせると、本研究の結果は管路被害推定について、従来の方法と比較して改良された推定法として位置づけられるものと考えている。

3. 上水道システムの地震被害の経年的影響の分析

3.1 分析方法と用いたデータ

震害の経年的影響を評価するにあたり、管路修理件数と漏水量の2つをパラメータとして取り上げる。漏水は地震被害の影響がリアルタイムで表れたものであり、修理件数はそれに対応する管理者側の対応行動を示し、震害の復旧過程をたどる情報になる。これらの量は、都市ごとに比較、考察が行えるように、さらに数年間にわたる上水道事業規模の拡大に伴う影響を除去するために、正規化する必要がある。そこ

表2 管種別被害率の比較⁷⁾ 単位:件/km

地震名等	事業体名	震度	CIP	DCIP	SP	ACP	VP	備考
宮城県沖 S53.6	塩釜市	5	0.23	0	0.90	2.44	-	3市平均 0.22件/km
	仙台市	5	0.07	0.03	0.40	1.37	0.18	
	石巻市	5	0.18	0.17	1.56	0.34	0.20	平均は管路 被害5箇所 以上の28 事業体
	平均		0.17	0.04	1.24	0.48	0.27	
日本海中部 S58.5	能代市	5	3.18	0.18	0	3.21	4.68	
	男鹿市	5	0.24	0.62	1.23	0.79	0.42	
	秋田市	5	0.08	0.04	0.55	0.21	-	3市平均 0.65件/km
	平均		0.22	0.08	0.64	0.94	2.24	
千葉県東 方沖 S62.12	山武(企)	5	-	0.03	0.44	0.33	0.09	3事業体 平均 0.082件/km
	長生(組)	5	-	0.01	2.28	0.20	0.04	
	市原市	5	-	0.01	0.16	0.03	0.06	平均は17 事業体
	平均		0	0.01	0.13	0.04	0.04	

	ACP: VP :CIP	
被害感度:宮城県沖	1:0.58:0.35	3地震の平均
日本海中部	1:2.38:0.23	1:1.34:0.32
千葉県東方沖	1:1.08:0.39	

表3 破壊率推定と実際の被害との検証

(a) 仙台市		(単位:件(件/km))			
	全体	ACP	VP	Metal	
実際の破壊数(破壊率)	115 (0.10)	39 (0.81)	43 (0.13)	33 (0.04)	
推定破壊数(破壊率)	213.5 (0.19)	20.5(0.42)	123.4(0.39)	69.2(0.07)	
(b) 能代市		(単位:件(件/km))			
	全体	ACP	VP	Metal	
実際の破壊数(破壊率)	411 (3.18)	228 (3.12)	155 (3.17)	28 (1.17)	
推定破壊数(破壊率)	119.5 (0.91)	62.1(0.85)	53.2(1.09)	4.1 (0.17)	

で、水量はシステムの給水人口及び1日の日数で正規化して($\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{日}$)、配水管・給水装置修理件数は配水管路布設延長で正規化して(件/km)の形で用いる。

上水道配水実績の推移、管路修理データは、仙台市水道局、能代市ガス水道局、男鹿市企業局に直接赴き資料収集を行った。担当技術者との討論により補足データや分析に関する意見を得、参考とした。

修理件数の中で、メータの摩耗による取り替えや、道路工事で誤って管路を破壊した場合などの修理件数は除外した。

漏水量は、浄水場のメータで測定される配水量から実際に使用されて各家庭のメータで測定された料金水量を減じた残りの水量(無効水量)を求めてこれを漏水量と考えた。漏水量は配水量で正規化した漏水率(=漏水量/配水量)を用いて比較の対象とした。

毎月の無効水量を正確に求めるためには、配水量と有効水量測定の間隔のずれを考慮する必要がある。これは配水量は浄水場で即時に読み取られるが、有効水量は検針員が各需要家を巡回し、前回と今回の検針日の差を読み取るにより測定されるために、時間差が生じることによる。そこで配水量と有効水量の変動の時間軸が一致するように、都市毎の検針活動の実情を考慮して有効水量を補正した。

地震被害を受けた後に測定される上水道システムの被害値には、平常状態での漏水量、修理件数も含まれるので、地震発生以前における平均値を求めておき、地震後の被害値がこのレベルまで戻った時点で、地震被害が収束したと判断する。これにより、地震被害の経年的影響を評価する指標として、「経年的影響を考慮した総地震被害量 L 」を次式で定義した。

$$L = \int_{t_0}^{t_r} \{d(t) - d_n\} dt \quad (9)$$

ここにおいて、 $d(t)$ は時刻(年または月) t における被害データ、 d_n は地震以前のデータから求められる平均値、 t_0 は地震発生日月、 t_r は経年的被害から回復したと判断される年月を表す。 $d(t)$ 、 d_n は具体的には漏水量、漏水率、管路修理件数などを表す。

3. 2 震害の経年的影響の分析結果

(1) 震害指標の地震後の経年変化

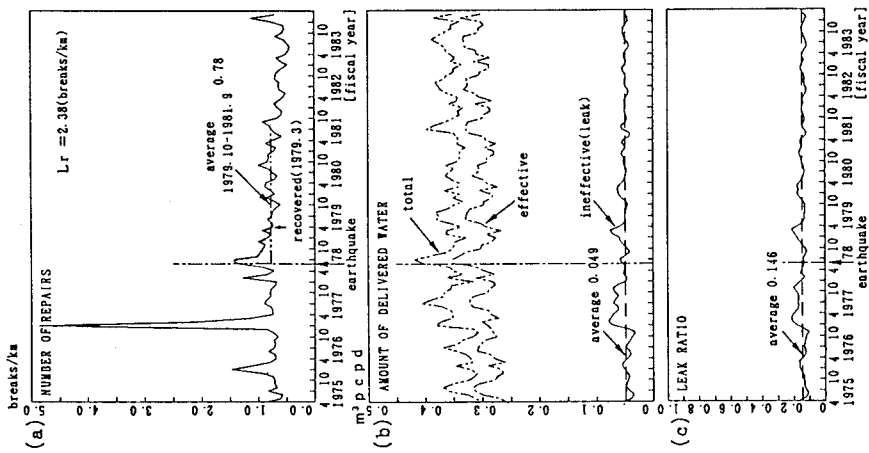
(a) 仙台市

図5(a)は、仙台市の配水管単位長さあたりの配水管及び給水装置の修理件数の月推移である。1977年までは冬季の寒波により、ACPの凍結に起因する多数の修理が行われた。地震が発生したのは、ACPからより強度が高く耐震性にも優れたCIPへと管種の改良が進められている時期であった。従って、平常値を表す平均値としては、仙台市の場合にはシステムが変化しつつあった地震前より、むしろシステムの改良がほぼ行きわたった地震後を基準にする方が妥当と考え、1979年10月から2年間の平均を求めて記入した。このような状況下で地震後の破壊修理件数にピーク現れ、回復までにおよそ10カ月を要している。

図5(b)は1人、1日あたりの配水量・有効水量・漏水量の月推移、(c)は漏水率の月推移を示した。同市では震後復旧作業が進められたが、前年同期や同月上旬の配水量と比較して相当量の地下漏水があるものと判断されたため、漏水調査が実施された。これにより20日間で288件の地下漏水箇所が発見され、漏水防止に効果を発揮した。このことから、月推移から見た漏水被害はほとんど現れていない。さらに同市は都市の規模が大きく、局所的な破壊の影響が全体のデータとして反映されにくかったことも一因と考えられる。

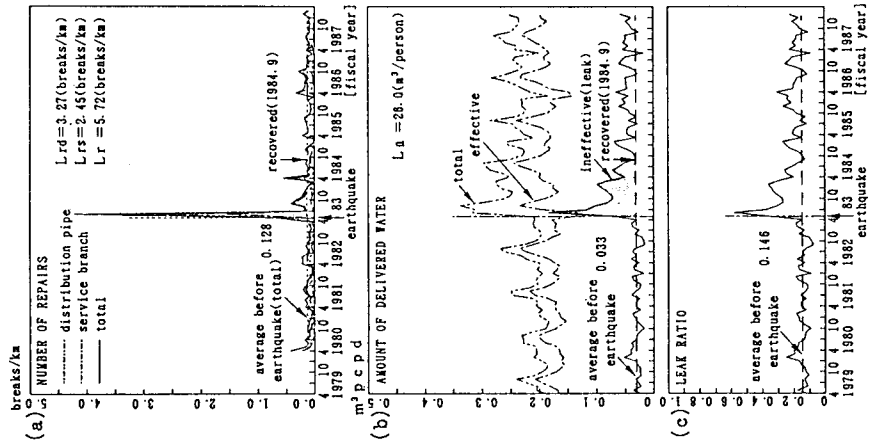
(b) 能代市

能代市の修理件数データは、配水管と給水装置に分離を行って示した。図6の(a)が修理件数、(b)が配水実績、(c)が漏水率の推移である。(a)では、震害復旧のための直接作業を表す1983年6、7月のピークの他に、震後約2年間、修理件数が地震以前の平均値よりも幾分大きくなっている。さらに(b)では、有効水量は地震後給水を再開するとともに季節変動を繰り返して始めるが、漏水量は大きく増加した後、季節的に変動し



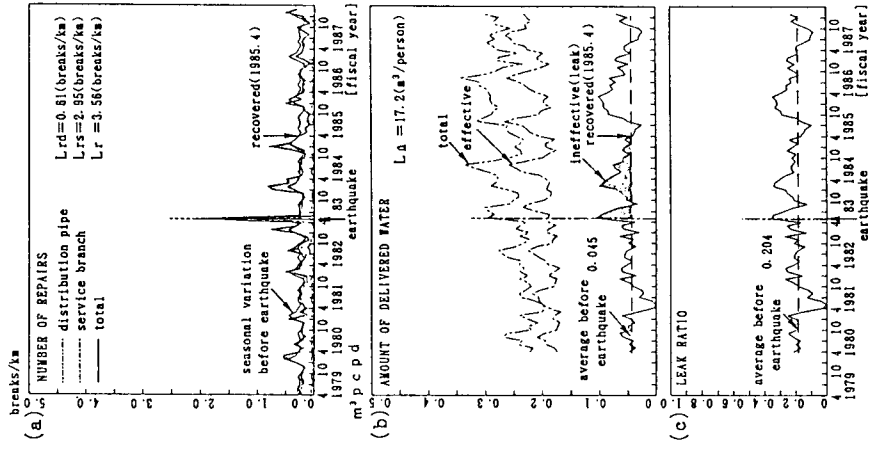
Monthly variation of the system state in Sendai City

図 5 仙台市



Monthly variation of the system state in Noshiro City

図 6 能代市



Monthly variation of the system state in Oga City

図 7 男鹿市

仙台市・能代市・男鹿市の上水道震害データの推移

図 5-7

ながら約2年を要して地震以前の水準へ戻っている。地震後すぐの漏水率は(c)より約60%にも及んだ。能代市では修理面から見た経年的影響は比較的少なかったが、漏水の被害が長く尾を引き、漏水箇所が序々に発見・修理されていった状況が推測できる。

(c)男鹿市

男鹿市の修理件数データも配水管と給水装置に分離した。図7(a)の修理件数の推移において、同市では冬季に修理件数が増大する顕著な季節変動があるので、地震以前4年間からこの平均的な変動を求めて、平常時の基準変動とした。(a)図によると、地震の翌年と翌々年の冬に、地震前より大きなピークが存在する。これは凍結の影響が地震による損傷と重なり顕在化した、寒冷な地方での特徴的事例と考えられる。一方、(b)の漏水量は、地震後一旦減少したものの翌冬に再び上昇している。(c)では地震後の漏水率は能代市ほどの大規模な液化状が発生しなかったことも一因となり36%であった。1985年秋以降にも漏水のピークが存在するが、これが地震の影響なのかどうかは、現時点では定かでない。

(d)Coalinga市

Isenberg⁸⁾が1983年コアリング地震で被災したコアリング市上水道の震害について、経年的影響を調査した結果(図8)によると、修理件数が地震以前の平常値に戻るまでに2年間を要している。同市は被災後も特別な復旧作業を行っておらず、地震の損傷に基づく修理が長く尾を引いたことが分かる。

(e)メキシコ市

図9にはメキシコ市上水道システムの、水源の井戸からの取水流量の月推移を示した。地震後は季節変動が乱され、流量が増加したまま地震前の水準に復していない。現時点のデータでは地震被害の収束には至っていないが、震害の経年的影響がやはり存在することが確認できる。

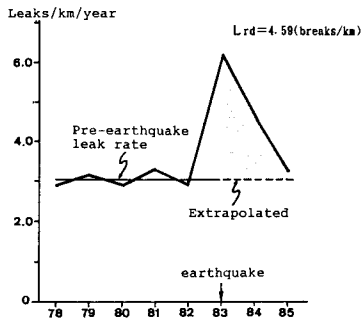


図8 Coalinga市上水道管路修理件数の推移⁸⁾

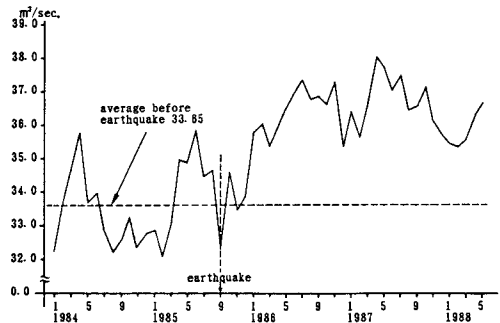


図9 メキシコ市水源井戸からの取水流量の推移

(2)被災直後の震害復旧と経年的影響の関係

式(9)で定義した総地震被害量 L は被害データの種類により次に分類される。

L_u : 給水人口1人当たりの漏水量総量(m^3 /人)

L_{rd} : 配水管延長1km当たりの配水管の修理件数総量(件/km)

L_{rs} : 配水管延長1km当たりの給水装置の修理件数総量(件/km)

L_r : 配水管延長1km当たりの配水管・給水装置の合計修理件数 ($L_{rd} + L_{rs}$: 件/km)

L_v : 取水流量の漏水量総量(m^3 /人)

図5～図8で震害の経年的影響に対応するグラフの部分に陰影を施し、同図中に総被害量 L の値を表示した。そして、調査の対象とした5都市の上水道システムの概要と、地震被害の特徴、経年的被害量をまとめて表4に示した。これらの都市のシステム規模には大きな差があるが、正規化した指標値を見比べることに

表4 上水道システムの地震被害の特徴

	仙 台	能 代	男 鹿	Coalinga ⁸⁾	Mexico City
①対象地震	1978年宮城県沖地震(1978.6.12) M _J =7.4	1983年日本海中部地震(1983.5.26) M _J =7.7		1983 Coalinga(1983.5.2) M _L =6.5	1985 Mexico(1985.9.19) M _s =8.1
②震 度	V (JMA)	V (JMA)	V (JMA)	VIII (MM)	VIII (MM)
③給水人口	624,000	48,000	28,000	6,500	18,000,000
④地震直前の使用水量	21.8×10 ⁴ m ³ /day (配水量) 0.36m ³ pcpd*	1.0×10 ⁴ m ³ /day (配水量) 0.21m ³ pcpd	0.68×10 ⁴ m ³ /day (配水量) 0.24m ³ pcpd		300×10 ⁴ m ³ /day (取水量) 0.17m ³ pcpd
⑤配水管延長	1,144km	145km	173km	42.8km	約12,500km
⑥管種比率	ACP 4% PVC 28% CIP 62% DCIP SP 6%	ACP 48% PVC 28% CIP 5% DCIP 16% SP 1% PP 2%	ACP 59% PVC 29% CIP 6% DCIP SP 6%	ACP 48% PVC 1% CIP 32% WIP 12% RC 7%	ACP 96% RC 4%
⑦配水管破壊箇所数(地震直後に修理されたもの)	115(259**)	461	108	130	7,400
⑧配水管破壊率(⑦/⑤) (件/km)	0.10(0.23**)	3.2	0.62	1.0	0.59
⑨給水管破壊箇所数(地震直後に修理されたもの)	1,391	231	219		
⑩給水管破壊率(⑨/⑤) (件/km)	1.24	1.59	1.27		
⑪合計管路破壊率(⑧+⑩) (件/km)	1.43(1.47**)	4.79	1.89		
⑫地盤変状・破壊の特徴	宅地造成地の崩壊、切土・盛土地域の移動	広範囲で液状化が発生	局地的液状化		軟弱地盤の沈下、大変形
⑬機能復旧に要した期間	8日	19日	6日		40日
⑭経年的影響の及んだ期間(回復年月)	10月(1979.3)	2年(1984.9)	2年(1985.4)	2年(1985)	
⑮ L _a (m ³ /人)	0.93	26.0	17.2		
⑯ L _{rd} (件/km)		3.27	0.61	4.59	
⑰ L _{rs} (件/km)		2.45	2.95		
⑱ L _r (L _{rd} +L _{rs}) (件/km)	2.38	5.72	3.56		
⑲ L _v (m ³ /人)					

* m³ pcpd=m³per capita per day (m³/人・日)

** 漏水調査により発見された件数を含む

よりこれらの都市での水道被害を比較検討できる。

図10に表4⑥の管種比率と⑧の配水管破壊率(震後機能回復までに修理されたもの)の関係を示した。横軸には比較的脆弱な管種であるACP及びVPの、全管種布設延長中の割合を、縦軸に破壊率を取った。仙台市、男鹿市、メキシコ市についてはデータが直線上に並び、管種比率と配水管破壊率が大きき相関を持っていることが分かる。能代市では大規模な液状化が発生したため破壊率が高く現れた。コアリंगा市でも高い破壊率を示しているが、この原因は定かでない。1つの理由として、同市がカリフォルニアの油田地帯に位置しており地中の電気伝導率が高いため鑄鉄管の腐食が著しいという傾向にあり、このためCIPの破壊率が高くなったのではないかとこの現地技術者の指摘がある。

図11には被災後の復旧作業による修理件数と、経年的影響を考慮した総修理件数の関係を示した。横軸には地震被災直後の修理件数を、縦軸には総修理件数 $L_r(L_{rd}, L_{rs})$ を取り、修理件数についての被害データが得られた4都市について分析した。同図で、各点の横軸からの垂距は総被害量に相当し、その中で45°の破線より下の部分

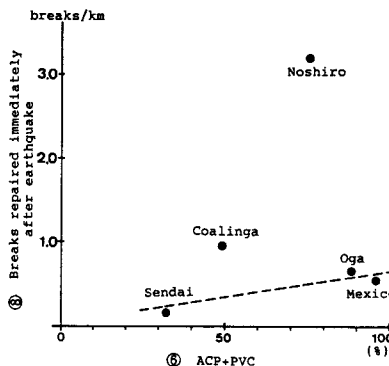


図10 管種比率と地震後の配水管破壊率の関係

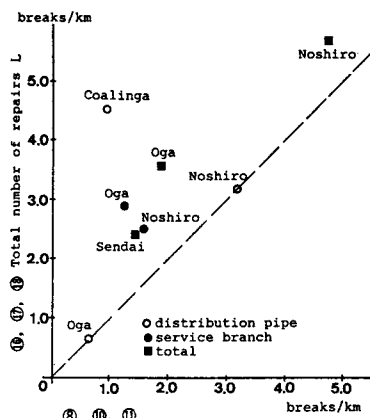


図11 地震直後の破壊数と総修理件数の関係

が被災直後に修理された量を、上側が経年的被害量を表している。図によると、配水管単独でのデータが得られている能代市、男鹿市では、両方の点が破線上に乗っており、配水管の修理は地震後の復旧作業によって終了したことを表している。一方、給水装置と合計の件数では、点は破線の上方にあり、総被害量は地震直後に修理された被害量の1.4~2.4倍程度に及んだことが分かる。これらの考察から、地震被害の経年的影響は主として給水装置の破壊として現れることが明らかになった。

4. 上水道管路系の耐震健全度評価のための定量的指標の提案

4. 1 上水道システムにおける耐震健全度評価に向けて

以上本研究において、上水道システムの被害を種々の観点から評価してきた。本章では、これらの震害指標を求めた基礎の上に立ち、上水道システムの耐震健全度評価を行うための試論を展開しようとするものである。

耐震健全度評価の一般的な方法を開発することの利点としては、異なるシステムの状況を比較できる客観的基準が得られること、個々のシステムの耐震性評価についても総合的に判断しうる基準が得られる可能性があること、などを挙げることができよう。しかしながら、いかなる指標によりシステムの耐震健全度を評価するかは単純な問題ではない。ここではその第1段階として、本研究の解析結果に基づき、耐震健全度評価に適用しうると考えられる定量的指標を列挙して、その意義を考察する。

そのため、次節4.2においては種々の被災度指標を提案する。「健全度」と「被災度」とは互いに相補的な関係にあると考えられるが、個々の震害要因に対する被災度を定量的に明確にした上でシステムの総合的健全度を評価するというステップを踏むべきであると考えられるものである。

4. 2 被災度指標の提案

耐震健全度のための被災度指標をまとめて表5に示した。

①~③の被害予測値は、2. で構築した破壊率予測モデルに基づき算出した。①の平均破壊発生確率はメッシュの破壊発生確率を市域全体で平均したもので、任意の区域で一件以上の破壊が生ずる確率を表す。②の平均破壊率は、市全体での配水管破壊率を表す。①②がシステム規模で正規化されたものであるのに対して、③は都市の規模も含んだ破壊件数である。

一方④~⑦は2. で説明変数として取り上げた要因であり、システム特性を表す。④は地盤パラメータ

表5 上水道システムの耐震健全度のための被災度指標

	被害予測値			配水管被災度				給水装置被災度	
	① 平均破壊発生確率(%)	② 平均破壊率(件/km)	③ 総破壊件数(件)	④ 平均Sn値	⑤ 宅造地割合(%)	⑥ 液状化割合(%)	⑦ 管種脆弱度	⑧ 経年影響期間(箇月)	⑨ 経年被害割合
仙台市	22.2	0.19	214	-0.057	12.8	0.0	0.435	10	1.77
能代市	30.1	0.85	120	0.106	0.0	30.4	0.932	18	1.47
男鹿市								24	2.37

Snを市域全体で平均化したもので、地盤の軟弱さを表す。⑤は宅造地に布設される管路の、全体に占める割合、⑥は液状化の発生した区域に布設された管路の割合を示したもので、⑤、⑥は地盤破壊地域の占める面積比率を示す。⑦は管種比率に基づく脆弱性を示したもので、文献7)による(管種による被害感度)×(都市毎の管種比率)から求めた。

①～⑦の値を仙台市と能代市と比較すると、①、②の正規化された被害予測値では、どちらも能代市の方が大きい。その要因となる④、⑤と⑥、⑦を見ると、能代市の方がいずれも厳しい条件にある。

⑧、⑨は給水装置の被災度指標である。3.の考察より、経年的被害は給水装置の破損が主原因であることが明らかとなったため、経年期間の被害に着目し給水装置の被災度指標と考えた。⑧は被害の経年期間を、⑨は給水装置の被災後の修理件数に対する総修理件数Lrsの比を表す。⑨では能代市が3都市中最も小さい。これは地震後断水して集中的に修理を行ったため、経年的には修理作業が少量であったことを示している。

給水装置の被災度については震後の調査結果から得ており、将来の予測とは直接には対応していない。しかしながら、震害データを蓄積し将来に役立たせることが重要であり、さらに⑧、⑨の指標値と④～⑦のようなシステム特性を対応づけて説明できれば、より詳細な評価が可能となる。給水装置被災度は、本表を第一歩にしてさらに考察を重ねる必要がある。

5. 結論

本研究は、上水道管路の地震被害について国内外5都市を対象に詳査を行い、震害要因分析と震害の経年的影響について調査し、震害の全体像を追跡した。さらに、上記の分析をもとに上水道システムの耐震評価のための共通の指標である耐震健全度の考え方を示し、その第一歩として被災度指標を算定、比較を行った。結論は以下に要約される。

- (1)水道管路の破壊予測モデルを、メッシュごとの破壊発生確率及び破壊した条件下での条件付破壊率の2段階で評価し、管路破壊の推定モデルを定式化した。
- (2)仙台市上水道システムと能代市上水道システムの管路破壊データを統合することにより、地盤破壊が生じなかった所では、破壊発生確率と地盤パラメータSnの間に線形的な相関関係が得られた。
- (3)これらの結果から、地盤パラメータSn、宅造地、液状化及び管種を説明変数として、(1)で定式化した管路破壊推定式の定量的な結果を示した。
- (4)震害の経年的影響を調査し、経年間の総被害量を示すパラメータLを提案した。調査の結果、地震の影響は震後最大2年に及ぶこと、その回復の軌跡にもシステムの条件により特徴があることが分かった。修理件数の分析から、主として給水装置の破壊が長く尾を引くことを明らかにした。
- (5)上水道システムの耐震強さを示す指標として、耐震健全度の考え方を示した。さらに健全度評価のための被災度指標を提案し、仙台市、能代市、男鹿市で指標値を算出することにより、実際の被害との関連を考察した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、京都大学大学院、能島暢呂氏には被害調査に同行いただき、研究の内容についても議論していただいた。仙台市水道局、能代市ガス水道局、男鹿市企業局の上水道担当技術者の方々には、資料収集に際し支援をいただいた。Dr. IsenbergにはCoalinga市の研究資料と結果の解釈について協力いただいた。能代市の液状化被害の分布と地盤資料に関して、九州工業大学安田進助教授から協力をいただいた。記して深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 表俊一郎・檜崎秀樹・三浪俊夫：宮城県沖地震のアンケート調査による震度について，第15回自然災害科学総合シンポジウム，昭52.10，pp.309-310.
- (2) 太田裕・鏡味洋史・後藤典俊・岡田成幸・堀田淳・大橋ひとみ：1983年日本海中部地震に伴う東北・北海道地域市町村別震度調査，北大耐震工学研究室論文集録No.3，昭61年8月，pp.45-48.
- (3) Kameda, H., Sugito, M. "Earthquake Motion Uncertainties as Compared Between Ground Surface Motion and Bedrock Input Motion - Characterization Using Evolutionary Process Models," 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Brussels, pp. 297-302, Aug., 1985.
- (4) 亀田弘行・杉戸真太：能代市水道管被害の分析，1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究，昭.59.3，pp.308-313.
- (5) 仙台市水道局：1978年宮城県沖地震による被害とその対策の記録，昭53.10.
- (6) 神田仁：上水道管路の震害要因分析と耐震健全度評価，京都大学修士論文，平元.3.
- (7) 千葉県企画部水政課：千葉県東方沖地震による水道施設の被害，ダクタイル鉄管，No.44，昭63.5，pp.7-26.
- (8) J. Isenberg, "Post-Earthquake Performance of Pipelines in Coalinga," Weidlinger Associates, Feb., 1986.

(1989年10月2日受付)