

## 兵庫県南部地震における地震外力指標とライフライン被害との関係

### Relationship between Lifeline Damage and Seismic Intensity Indexes During the Kobe Earthquake

鍵田泰子  
Yasuko Kuwata

渡部龍正  
Tatsumasa Watanabe

#### 1. はじめに

上水道、下水道、ガス等の地中管路の地震時の挙動は、周辺地盤と一体となって挙動するため、変位やひずみに支配されることが知られている。そのため、地中管路の耐震性を検討する上で、地震時における地盤の変位やひずみを評価することは非常に重要である。実際、地中管路の耐震設計では、応答変位法を用いることが基本とされており、地盤の変位やひずみが設計荷重とされている<sup>1),2)</sup>。

国内の自治体、ライフライン事業体などの被害想定では、最大加速度 (PGA)、最大速度 (PGV)、スペクトル強度 (SI 値)、液状化の程度や震度階などの地震動強度指標を入力地震動として用いている。東京都と日本水道協会は、PGV に基づいた上水道管の耐震設計法を採用し、他の多くの自治体は、上下水道に対する PGA に基づく評価法<sup>3)</sup>を 1995 年の兵庫県南部地震の被害調査結果により修正した式を採用している。ガス協会では、数種の想定地震に対して PGV や SI 値を用いてガス管路網の被害評価を行っている。これらの地震応答の最大値に基づく手法では地震動増幅の大きな沖積地盤で大きな被害が想定されるが、実際の管路被害は、地形・地質境界部に埋設管の被害が集中している<sup>4),5)</sup>。したがって、水道管などの地中線状構造物では、地表の最大応答値よりも管周辺の局所的に地盤応答が変化するところでより強く受けるように考えられる。

酒井ら<sup>6)</sup>は、新潟県中越地震において、液状化や構造物の被害に伴わない場合には、PGV Gradient が PGV よりも管路の損傷との相関が強く、広域水道管ネットワークの被害予測に有効であると示している。本研究では、1995 年兵庫県南部地震での神戸市周辺の変位量から永久ひずみを算出するとともに、永久ひずみと PGV、PGV Gradient の地震外力に対して、神戸市の水道管路、下水道管路の被害との比較を行い、管路被害と整合する地震外力について再検証することが目的である。

#### 2. 検討地域の選定

本研究では、被害と外力の対象地域を 3 地域に絞って検討する。沖村・鳥居<sup>7)</sup>が地震動や木造構造物の被害率について検討していることから、図-2. 1 に示す同じ 3 測線を用いることとした。それぞれの測線周辺の特徴として、東部地区は灘区、東灘区を含む地域で、帯状の被災地域が顕著な地域、中部地区は中央区と兵庫区の一部東側を含む地域で、被災の程度がそれほど顕著ではなく、震度 7 の帶が一度途切れる地域、西部地区は兵庫区の西部と長田区、須磨区の地域で、帶

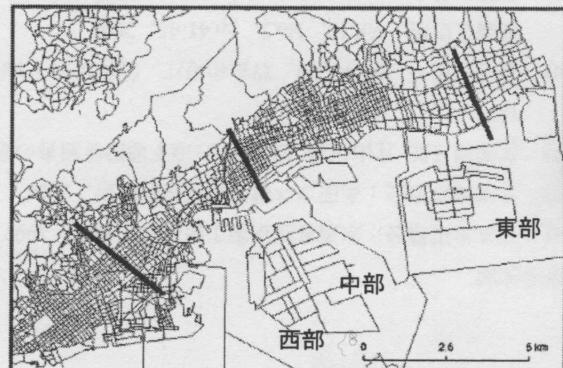


図-2. 1 3 測線の位置図

状の顕著な被災分布を示すとともに、大きな火災があった地域であることが挙げられる。

### 3. 地震外力の設定

#### 3. 1 永久ひずみ

永久ひずみは、田中<sup>8)</sup>による地盤変位資料をデータベース化して算出したものである。地盤変位は GPS や空中写真によって地震前後の基準点の地盤変位を測定して求められている。図-3. 1に各測線周辺の永久変位のベクトル図を示す。3 测線の周囲 500m での変位量の合計数は 1,174 となる。次に、基準点をもとに三角形要素を作成し、三角形要素の各節点の変位量からひずみを算出した。図-3. 2 に各測線周辺の三角形要素図を示す。三角形要素の節点間隔は平均 200m 程度である。三角形要素内のひずみは一定値と考え、変位量からひずみを計算する。2 次元のひずみの計算式は次のようになる。

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (4)$$

ここで、 $u : X$  方向の変位量(m)、 $v : Y$  方向の変位量(m)、 $\varepsilon_x : X$  方向の軸ひずみ

$\varepsilon_y : Y$  方向の軸ひずみ、 $\gamma_{xy}$  :せん断ひずみ、 $\varepsilon_{xy}$  :工学ひずみ

次に、ひずみの計算を行う。1 つの三角形要素に注目し、この三角形の中の変位を 1 次式で近似する。これは、要素内のひずみが一定（変形が一様）であるとみなしたことと相当する。

$$u = \alpha_{10} + \alpha_{11}x + \alpha_{12}y \quad (5)$$

$$v = \alpha_{20} + \alpha_{21}x + \alpha_{22}y \quad (6)$$

三角形要素の頂点の番号を  $i$ 、 $j$ 、 $k$  とすると、 $u$ 、 $v$  は次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i = \alpha_{10} + \alpha_{11}x_i + \alpha_{12}y_i \\ u_j = \alpha_{10} + \alpha_{11}x_j + \alpha_{12}y_j \\ u_k = \alpha_{10} + \alpha_{11}x_k + \alpha_{12}y_k \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i = \alpha_{20} + \alpha_{21}x_i + \alpha_{22}y_i \\ v_j = \alpha_{20} + \alpha_{21}x_j + \alpha_{22}y_j \\ v_k = \alpha_{20} + \alpha_{21}x_k + \alpha_{22}y_k \end{array} \right. \quad (8)$$

式(3.7)、(3.8)の連立方程式の解は次のような。

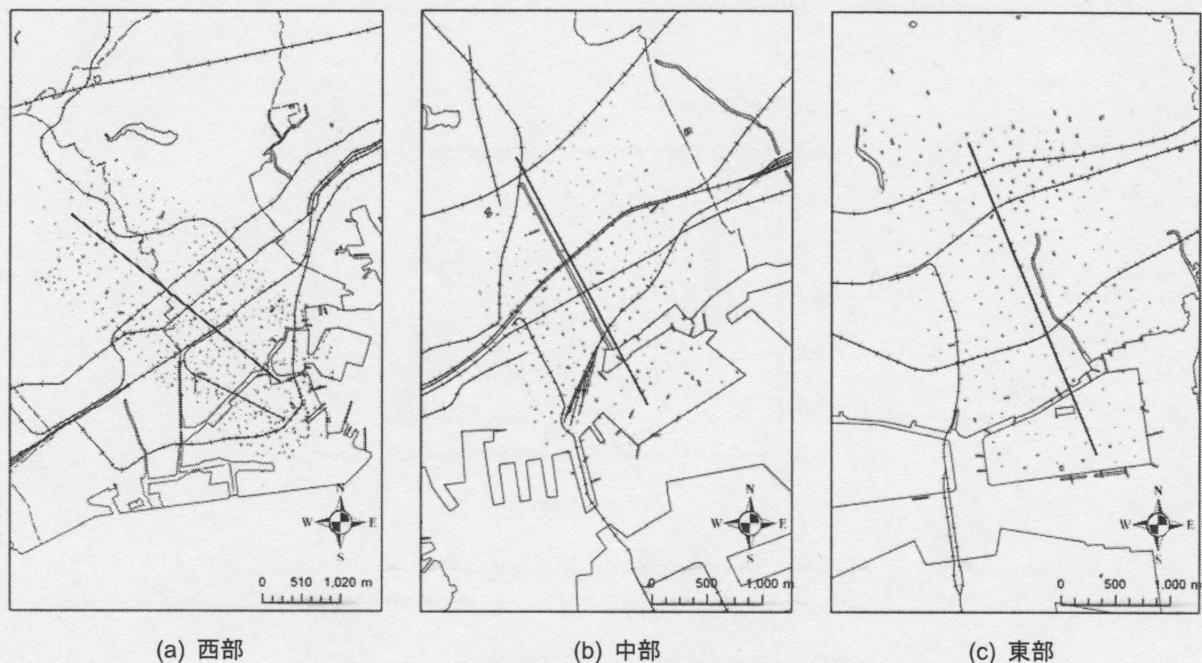
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha_{11} = \frac{(y_j - y_k)u_i + (y_k - y_i)u_j + (y_i - y_j)u_k}{\Delta} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = \alpha_{12} = \frac{(x_k - x_j)u_i + (x_i - x_k)u_j + (x_j - x_i)u_k}{\Delta} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \alpha_{21} = \frac{(y_j - y_k)v_i + (y_k - y_i)v_j + (y_i - y_j)v_k}{\Delta} \\ \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_{22} = \frac{(x_k - x_j)v_i + (x_i - x_k)v_j + (x_j - x_i)v_k}{\Delta} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\Delta = (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i) \quad (10)$$

この方法によって、三角形要素内のひずみを計算する。

ひずみを計算するにあたって、座標  $x$ 、 $y$  と変位  $u$ 、 $v$  については、基準軸(XY 軸)を東西南北方向から測線方向と測線直角方向に基準軸の変換を行い、 $x$ 、 $y$ 、 $u$ 、 $v$  を座標変換し、測線に対するひずみを算出した。

各測線周辺の永久ひずみ分布を図-3. 3 に示す。永久ひずみは、測線方向に伸び測線直角方向に縮むひずみを正としている。永久ひずみは 3 測線ともにほぼ±1%以下の値となった。分析には測線と測線から東西に 500m オフセットした測線のひずみの平均を用いる。

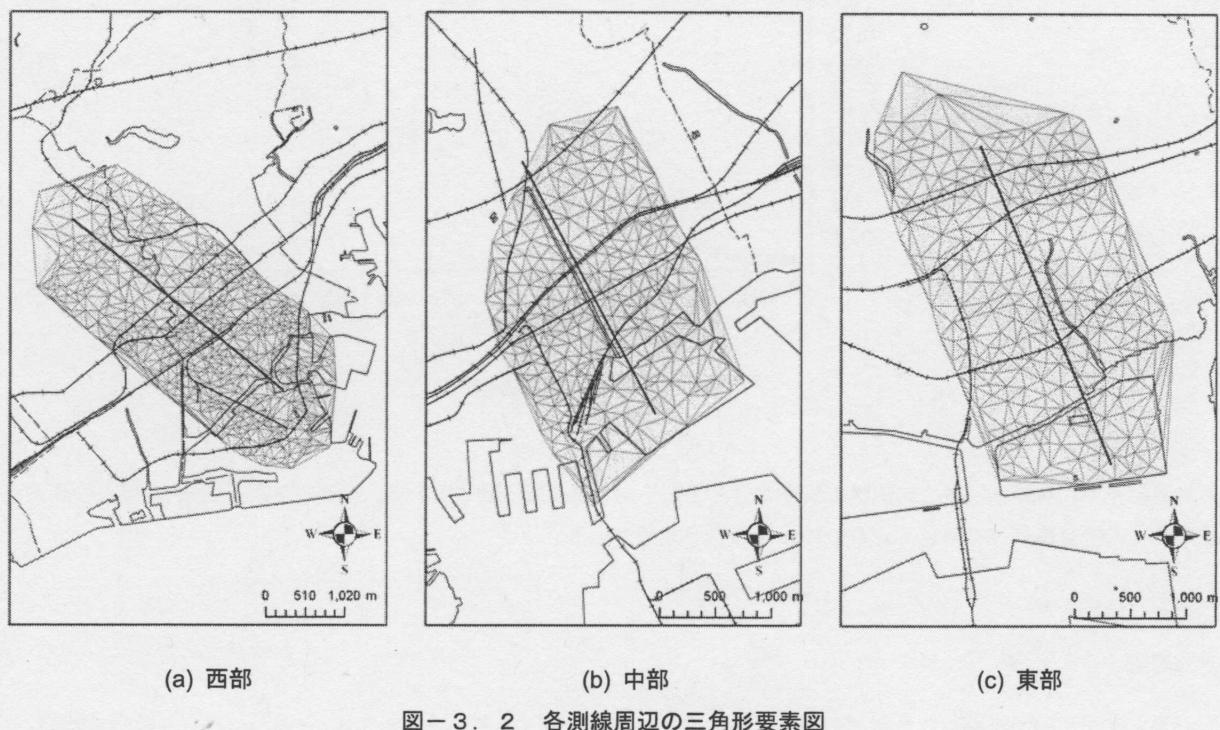


(a) 西部

(b) 中部

(c) 東部

図-3. 1 各測線周辺の永久変位のベクトル図



(a) 西部

(b) 中部

(c) 東部

図-3. 2 各測線周辺の三角形要素図

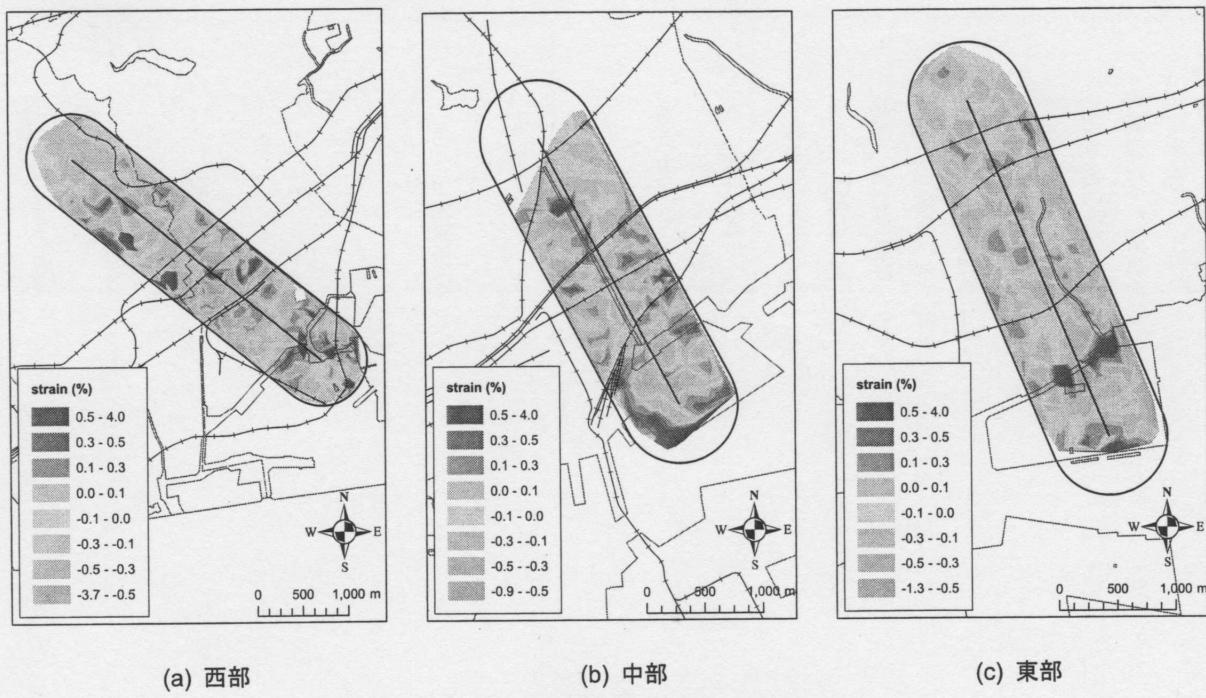


図-3.3 各測線周辺の永久ひずみ分布

### 3. 2 PGV

各測線周辺のPGV分布を図-3.4に示す。PGVについては、松島・川瀬<sup>9)</sup>の地震動シミュレーションの結果を用い、測線と測線から東西に500mオフセットした測線のPGVの平均を用いる。

松島・川瀬<sup>9)</sup>は震源モデルを、三次元グリーン関数を用いたグリッドサーチ法により同定し、神戸市域全域を対象に震源近傍強震動および震災の帶を推定した。具体的には、本震記録が観測された観測点のうち、表層地盤の影響の少ない神戸海洋気象台(JMA)、神戸大学(KBU)、本山第一小学校(MOT)、特徴的なパルスがみられるJR鷹取駅(TKT)での観測記録をターゲットとして震源モデルの同定を行うため、これらの観測点位置において三次元有限差分法を用いて相反定

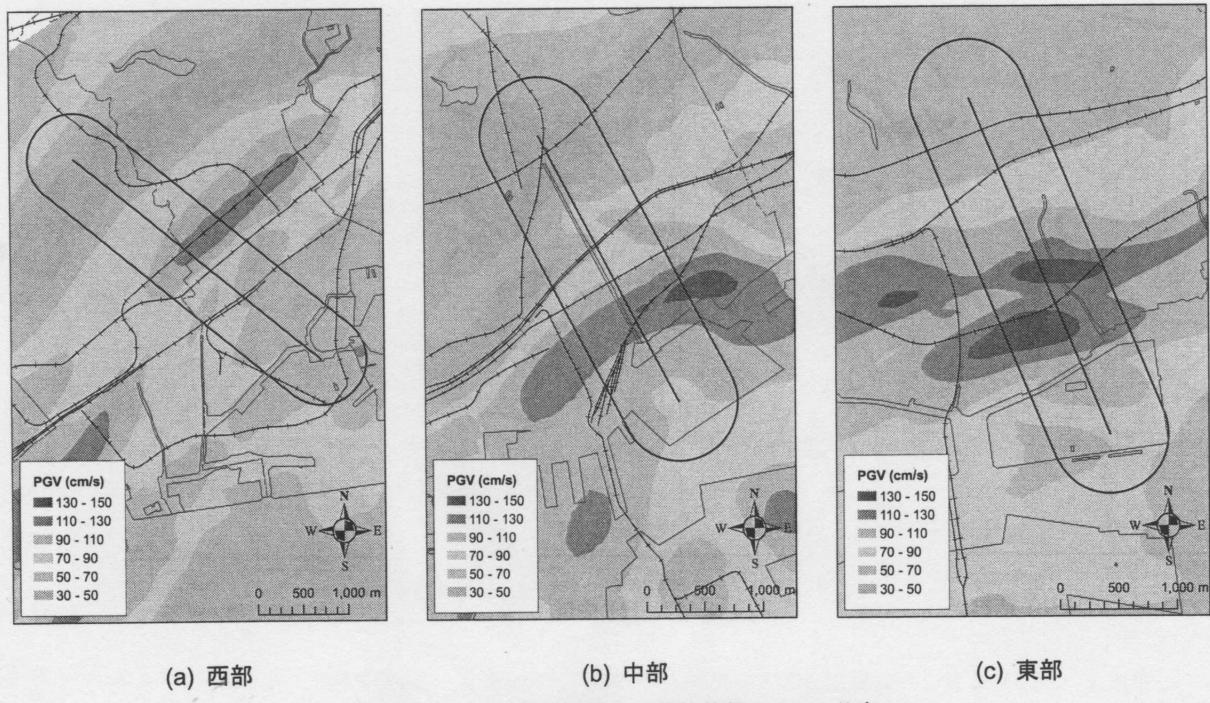


図-3.4 各測線周辺の工学的基盤のPGV分布

理を利用することにより三次元グリーン関数を計算した。グリーン関数を計算する際の物体力の時間関数は継続時間0.06sの単純な三角形パルスとした。余震観測記録を用いて基盤速度構造をチューニングされた三次元地盤モデルを用いて三次元有限差分法の計算を行い、震源領域の各格子点において三次元グリーン関数を計算した。その際の格子点間隔は0.04kmとして計算を行っている。松島・川瀬の地震動シミュレーションの結果のPGV分布は工学的基盤 ( $V_s=400\text{m/s}$ )での最大速度分布を示している。

本研究で扱うPGVは地表面での最大速度なので、松島・川瀬の工学的基盤 ( $V_s=400\text{m/s}$ ) での最大速度に地盤の増幅度  $AF_{PGV}$  を掛けることにより導出した。地盤の増幅度  $AF_{PGV}$  に関しては、藤本・翠川<sup>10)</sup>が提案している深さ30mでの平均S波速度AVS(30)から地盤の増幅度  $AF_{PGV}$  を算出する式を提案している。彼らは1987年千葉県東方沖地震( $M_6.7$ )での強震記録に基づく第三紀の地盤での距離減衰式からの予測値に対する観測値の比を地盤増幅度( $AF$ )と定義し、これと地表から深さ  $d$  (m)までの地盤の平均S波速度  $AVS(d)$  (m/s)の関係について検討している。その結果、最大加速度に対する地盤増幅度( $AF_{PGA}$ )はAVS(10)の場合に最も相関が良く、最大速度に対する地盤増幅度( $AF_{PGV}$ )はAVS(30)の場合に相関が高いことを示している。最大速度に対する地盤増幅度は以下の回帰式を用いる。

$$\log AF_{PGV} = 2.367 - 0.852 \cdot \log AVS(30) \pm 0.166 \quad (11)$$

ここで示す  $\pm 0.166$  は工学的基盤の最大速度（既知）から地表面の最大速度を予測する際のバラツキ（標準偏差）であり、本研究では最も PGV が大きくなる値 ( $AF_{PGA}$  の最大値)  $+0.166$  を用いる。

深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 AVS(30)は、図-3.5 に示す防災科学研究所の地震ハザードステーション(J-SHIS)<sup>11)</sup>によって各測線における AVS(30)を推定し、上記の式に代入し、図-3.6 に示す地盤増幅度を算出した。

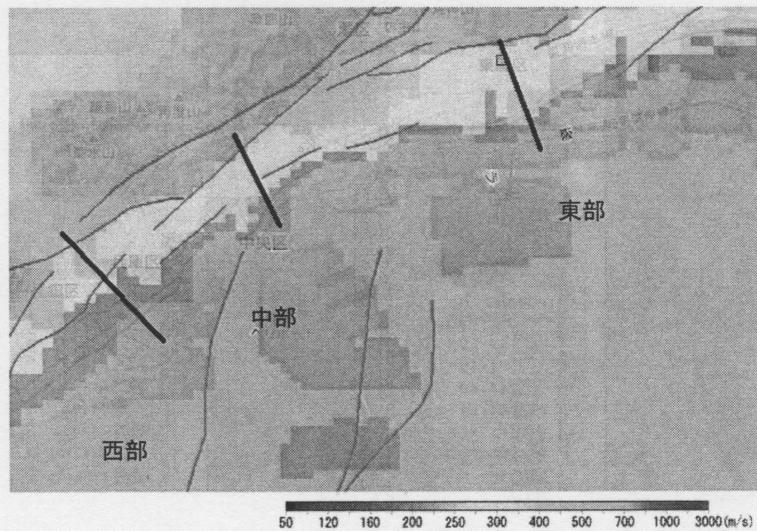


図-3.5 各測線周辺の AVS(30)分布<sup>11)</sup>

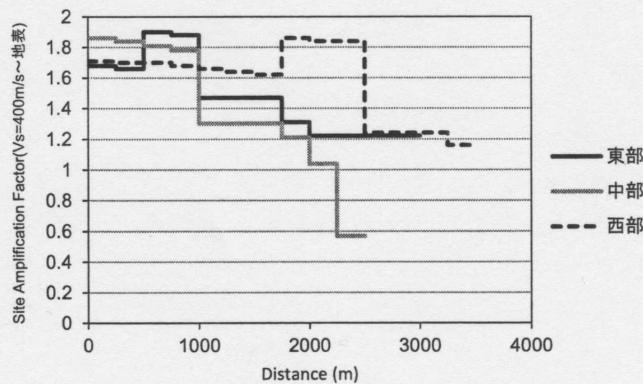


図-3.6 各測線の地盤増幅度

### 3. 3 PGV Gradient

酒井ら<sup>6)</sup>は、地震時の水道管路の被害を評価するために、地動の変化率として *PGV Gradient* ベクトル(*G*)を提案している。

$$G = \frac{\partial PGV_{xy}}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial PGV_{xy}}{\partial y} \hat{j} \quad (12)$$

ここに、 $PGV_{xy}$  は 250m メッシュのグリッド  $x, y$  における最大地表面速度、 $i, j$  はそれぞれ東、北向きの単位ベクトル。

酒井ら<sup>6)</sup>は、水道管のような地中の線状構造物の地震被害は、地盤の軸ひずみ、せん断ひずみに依存する。*PGV Gradient* は、*PGV* の出現時刻などが考慮されておらず、速度の空間変化率の最大値を表すものではないが、地盤ひずみとの相関は *PGV* よりも高いと想定され、液状化や土砂災害に伴う被害を除くと *PGV* よりも *PGV Gradient* は相関が強いことを示している。

本研究の *PGV Gradient* は *PGV* の測線方向の変化のみを扱った。*PGV Gradient* は 100m 間隔に 200m の範囲の速度勾配で評価をした。各測線の基盤の勾配が最大で 1 : 20 であるため、200m 以上の範囲で速度勾配を評価してしまうと *PGV Gradient* は小さな値となるのを避けた。各測線周辺の工学的基盤での *PGV Gradient* 分布を図-3. 7 に示す。各測線をみると、測線に直交するように *PGV Gradient* の帯が存在することが分かる。このことから、地中管路の被害は測線方向に広がっているのではなく、測線直角方向に広がるものと推定することができる。

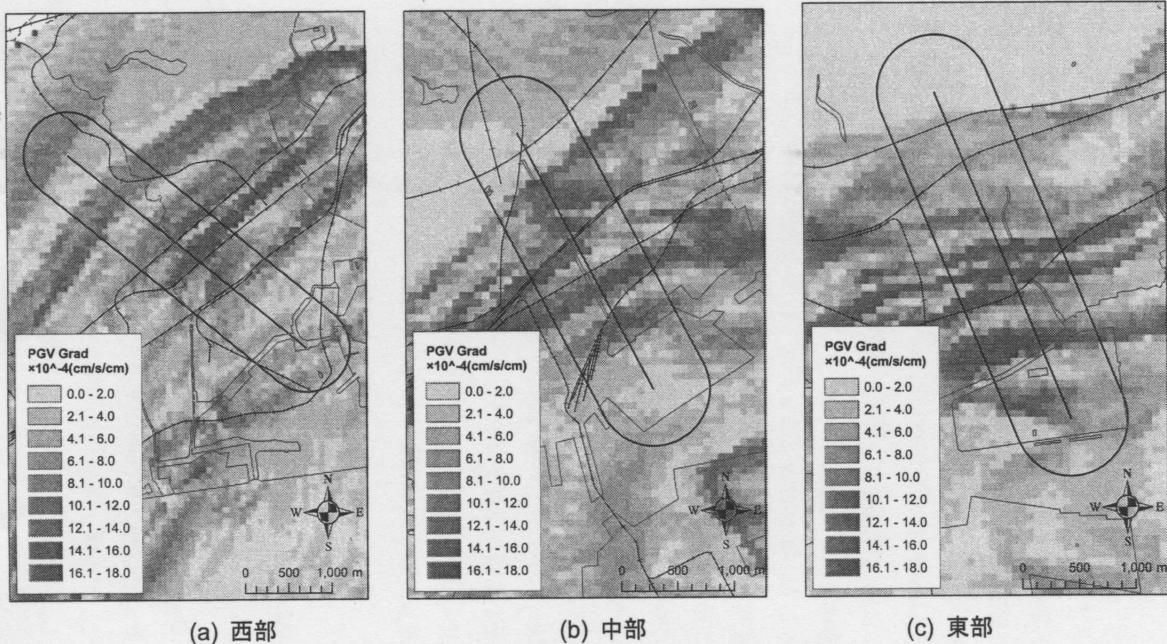


図-3. 7 各測線周辺の *PGV Gradient* 分布

### 4. 地震外力指標と地中構造物被害との関係

#### 4. 1 水道管路・下水道管路被害率

図-4. 1、4. 2 に各測線周辺の水道・下水道の管路網と被害分布を示す。図下部に各測線の領域全体の被害率を示す。水道管路・下水道管路の被害率の算出は、各測線の周囲 500m の領域を測線直角方向に 100m ごとに分割した領域の被害率で評価をした。水道については、配水管の被害件数を管路延長で除した被害率(件/km)で評価をした。一方、下水道については、管路被害区間を下水道管路延長で除した被害率(%)を用いた。水道管路被害率については、下水道管路被害率に比べて、被害率が大きく、単位も違うことから、水道管被害率を 0.025 倍し、被害指数 *P* として、以下の比較を行っている。下水道管路被害率は被害指数 *P* と同じとする。図-4. 3 に各測線の水道管路・下水道管路被害率を示す。図上部に震度 7 の地域と液状化被害地域の範囲を併せて図示している。管種や口径などの管路属性の影響も考え

られるが、本章ではそれらの要因については考慮していない。水道管路・下水管路の被害は、西部では山側が大きく、中部、東部は海側の液状化被害のあった地域に集中して発生している。西部の山側には、脆弱な鉄管が多く埋設されていた<sup>12)</sup>ために水道管路被害率が増大したと考えられるが、測線上の2つの管路被害率は類似していることが確認できる。また、各測線の領域全体の水道管路被害率は、西部が最も大きく、東部が小さな値となった。これは、東部が西部・中部に比べて鉄管の埋設量が少なかったことが原因と考えられる。しかし、各測線の領域全体の下水管路被害率は、中部に被害が集中した地域があるため大きな値となっているが、西部・中部・東部ともに同じような値となった。

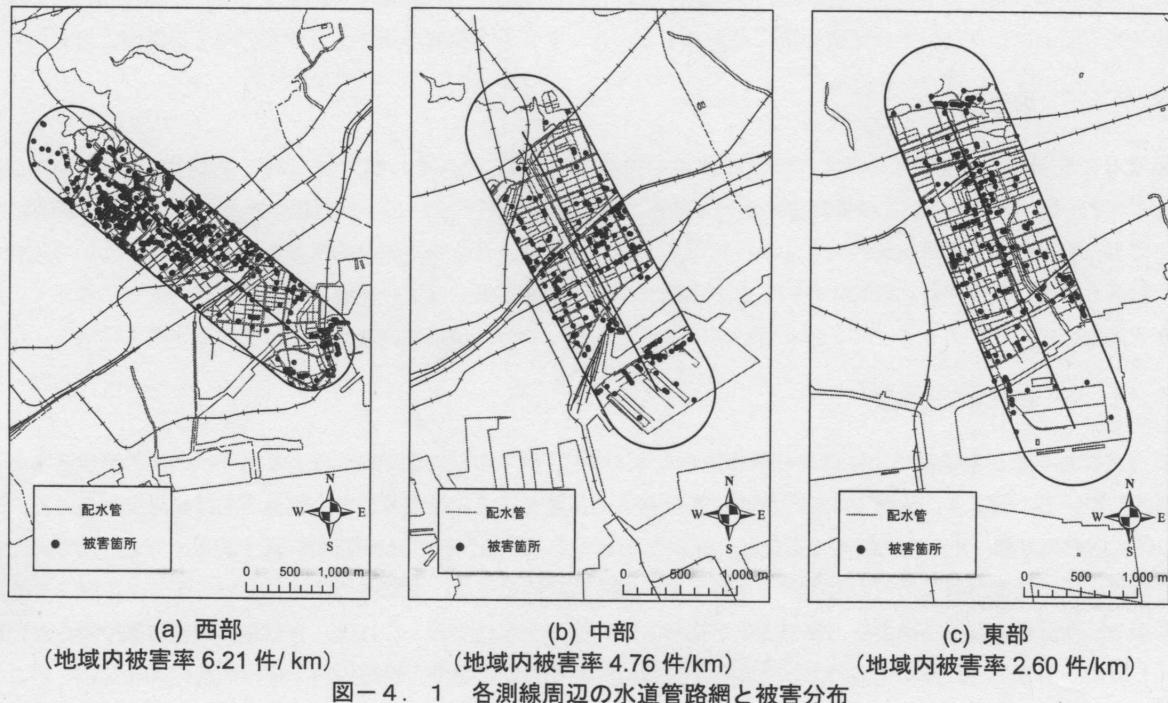


図-4. 1 各測線周辺の水道管路網と被害分布

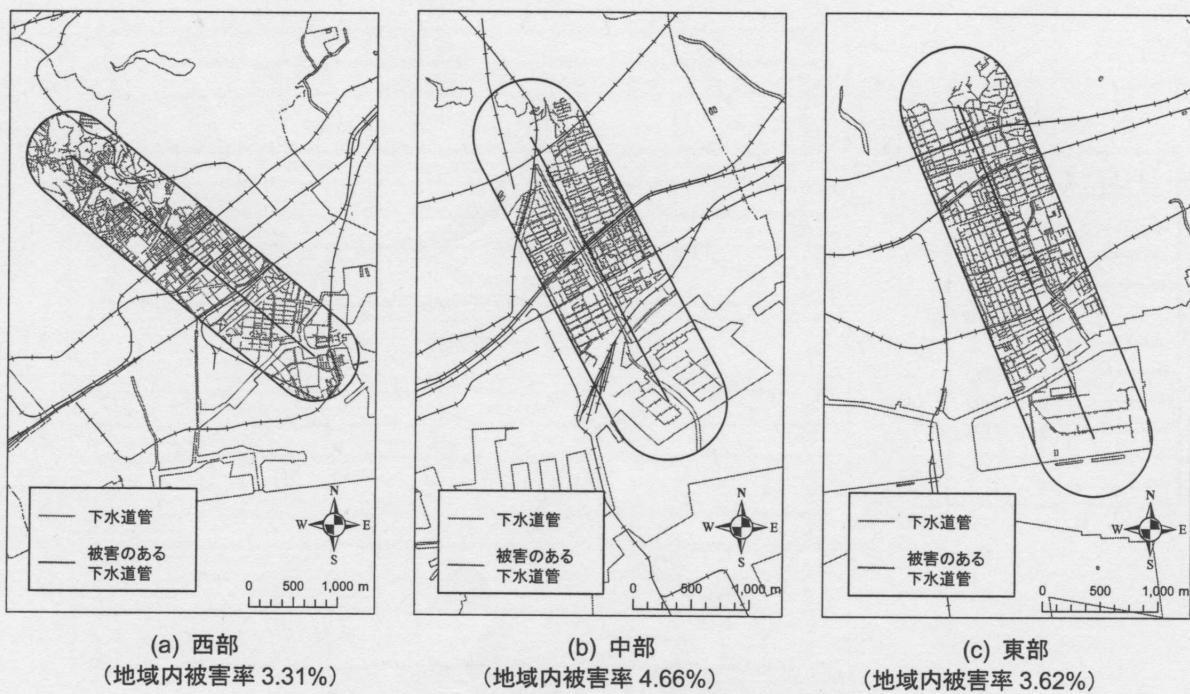


図-4. 2 各測線周辺の下水管路網と被害分布

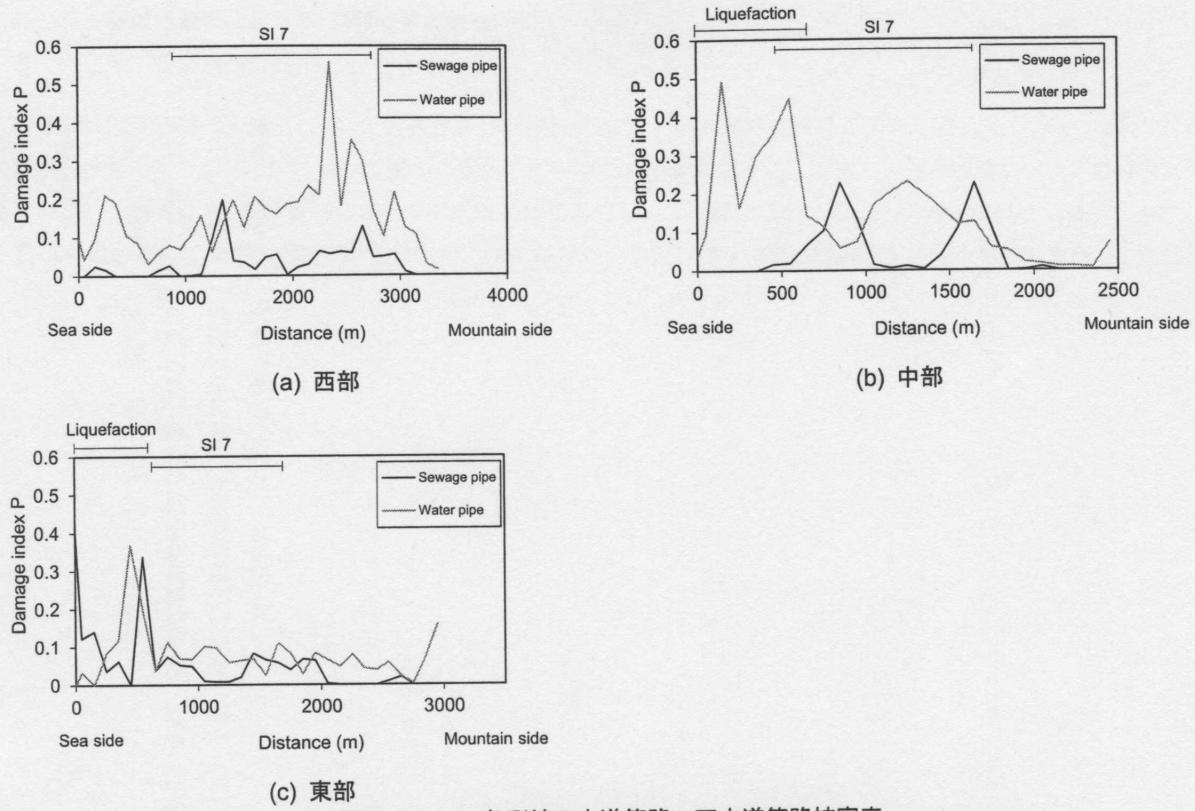


図-4. 3 各測線の水道管路・下水管路被害率  
( $P=0.025 \times$  水道管路被害率(件/km)、 $P=$ 下水管路被害延長(km) / 下水管路延長(km))

#### 4. 2 水道管路・下水管路被害率と永久ひずみ、PGV、PGV Gradient の関係

図-4. 5、4. 6、4. 7 に永久ひずみ、PGV、PGV Gradient と水道管路・下水管路被害率の関係を示す。永久ひずみ、PGV Gradient の値は絶対値とし、測線の基準(水平軸の 0)を海側にした。図-4. 5 から、東部では管路被害率と永久ひずみは一致している。西部の山側は、水道管の管種の影響により、永久ひずみと水道管路被害率が一致していない。また、中部・東部の液状化地域は管路被害率・永久ひずみともに大きな値となっている。このことから、永久ひずみは、表層地盤が液状化した地盤や軟弱な地盤では管路被害を推定することが可能と考えられる。

PGV との関係は、図-4. 6 より、PGV や震度 7 の領域と管路被害のピークは必ずしも符合しない。また、地表面の PGV と工学的基盤での PGV は海側では増幅が大きく、山側にいくにしたがって増幅は小さくなる。しかしながら、どちらの PGV 分布もピークの位置は変わらない。

PGV Gradient については、西部では管路被害率と PGV Gradient が一致している。東部についても PGV Gradient は管路被害をおおよそ評価できている。しかし、管路被害率と PGV Gradient が一致しない部分もあり、今後検討する必要がある。また、PGV Gradient は液状化地域ではあまり大きな値を示していない。これは、液状化すると、地盤は一様に長周期で揺れるため、図-4. 6 からも分かるように速度の変化があまり見られない。よって、PGV Gradient は小さな値となったと考えられる。このことから、一方、永久ひずみは海側の軟弱地盤、液状化地域では PGV Gradient よりも管路被害と相関が強い。軟弱な地盤の地域で液状化評価が適切に行えれば、永久ひずみは被害想定における有効な指標であると考えられる。以上のことから、限られた範囲の分析から得られたものではあるが、地震による管路被害は PGV や震度よりも永久ひずみや PGV Gradient の方が被害想定する地震外力指標として適当と考えられる。

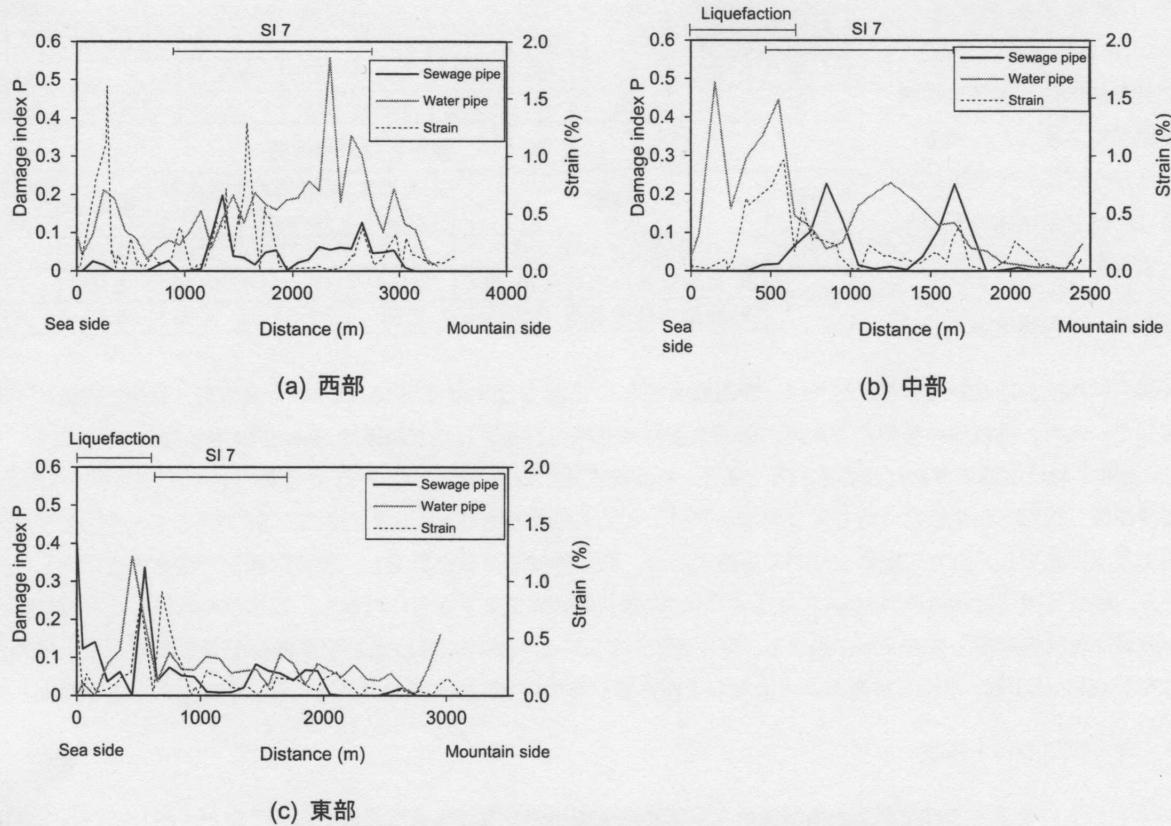


図-4. 5 水道管路・下水管路被害率と永久ひずみとの関係

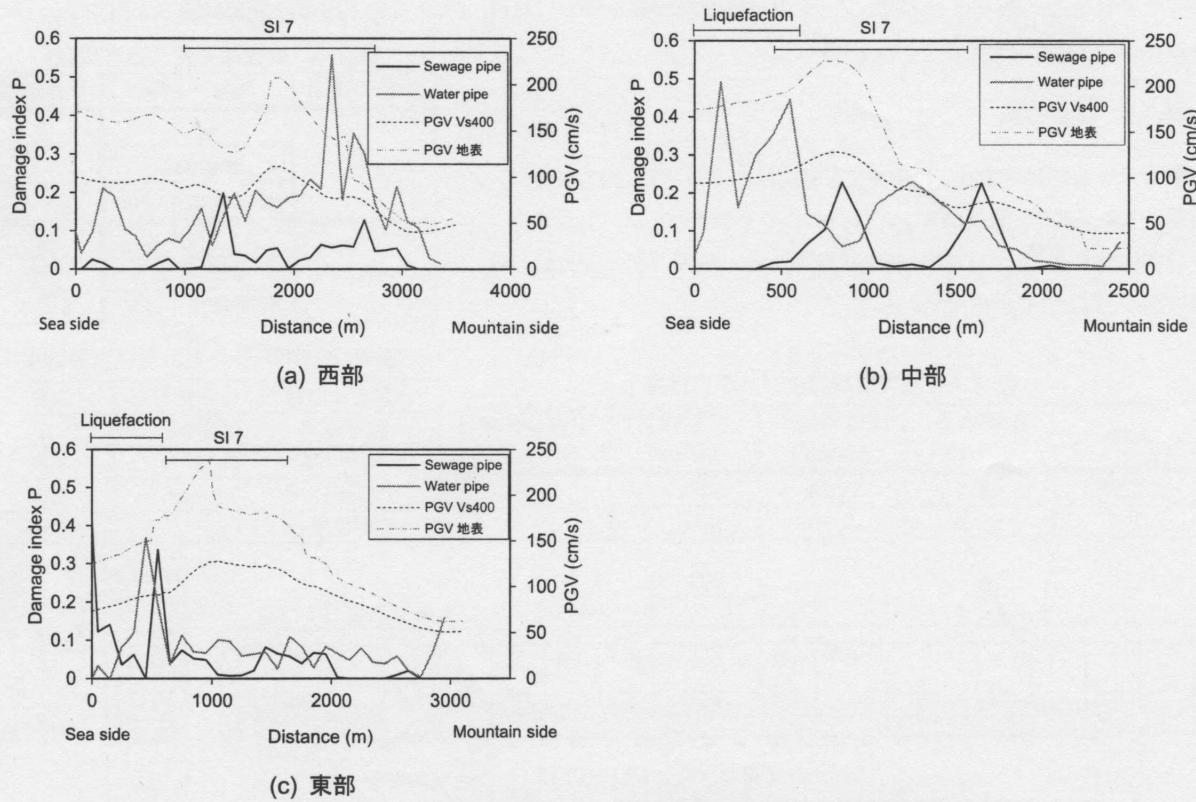


図-4. 6 水道管路・下水管路被害率と PGV との関係

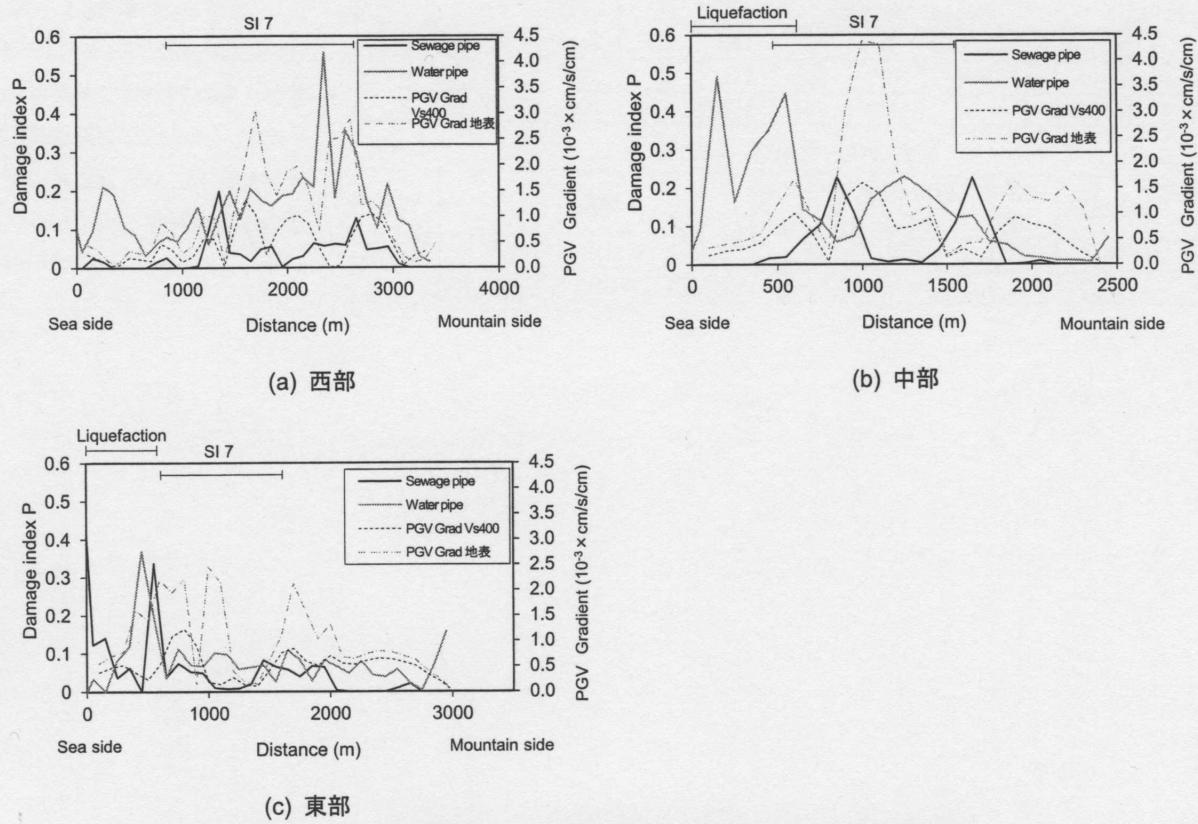


図-4. 7 水道管路・下水道管路被害率と PGV Gradient との関係

## 5.まとめ

本研究では、1995年兵庫県南部地震での神戸市周辺の変位量から永久ひずみを算出し、永久ひずみと PGV、PGV Gradient の地震外力に対して、神戸市の水道管路、下水道管路の被害との比較を行い、管路被害と整合する地震外力について再検証した。以下に本章で得られた知見を述べる。

- 1) 水道管路・下水道管路の被害は、西部では山側が大きく、中部、東部は海側の液状化被害のあった地域に集中して発生している。西部の山側には、脆弱な鉄管が多く埋設されていたために水道管路被害率が増大したと考えられるが、測線上の2つの管路被害率は類似している。
- 2) 永久ひずみは海側、液状化地域では PGV Gradient よりも管路被害と相関が強いことが得られた。地質や土質の空間的情報を用いて軟弱な地盤の地域で液状化評価ならびに沈下や側方流動の推定が適切に行えれば、永久ひずみは被害想定における有効な指標であると考えられる。
- 3) 斜面側面で評価した PGV や震度7の領域と管路被害のピークは必ずしも符合しないことが示された。このことから、PGV や震度が大きな地域でも、必ずしも管路被害率は高くはならず、それ以外の要因も検討する必要があることがわかった。
- 4) PGV Gradient については、西部、東部については管路被害をおおよそ評価できている。管路被害率と PGV Gradient が一致しない部分もあり、今後検討する必要がある。

以上のことから、限られた範囲の分析から得られたものではあるが、地震による管路被害は PGV や震度よりも永久ひずみや PGV Gradient の方が被害想定する地震外力指標として適当と考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997
- 2) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2004
- 3) 久保慶三郎，片山恒雄，佐藤暢彦：地下埋設管震害の定量的解析，日本地震工学シンポジウム講演集，Vol.4, pp.665-662, 1975
- 4) 長谷川浩一，酒井久和，若松和寿江，佐藤忠信：2004年新潟県中越沖地震における水道管被害の空間分析，GIS－理論と応用，Vol.13, No.2, pp.41-45, 2005
- 5) 地盤工学会：2007年新潟県中越沖地震災害調査報告書，pp.591-599, 2009
- 6) 酒井久和，長谷川浩一，Pulido Nelson：広域水道管路に対する震害予測手法の提案－2004年新潟県中越地震への適用－，土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp.561-567, 2010.
- 7) 沖村孝，鳥居宣之：高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」の構築とその活用事例，土木学会論文集C, Vol.63, No.4, pp.1001-1019, 2007.12.
- 8) 田中耕平：1995年兵庫県南部地震による地表面変位量図，防災科学研究所，1996.9.
- 9) 松島信一，川瀬博：1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価，日本建築学会構造工学論文集，vol.55B, pp.537-543, 2009.3.
- 10) 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，第6巻，第1号，pp.11-22, 2006
- 11) (独)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 12) 日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，1996.5.

## 著　者

- 鍬田 泰子 研究員，博士（工学），地震工学  
 渡部 龍正 明治コンサルタント株式会社，修士（工学）