

新潟県中越地震による 震源域での上水道管路被害と地盤変位について

大嶽公康¹・大町達夫²・久保剛太³

¹日本上下水道設計株式会社 水道事業本部設計部（〒105-0022東京都港区海岸1-9-15）

E-mail:kimiyasu_ohtake@njs.co.jp

²東京工業大学総合理工学研究科教授（〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259）

E-mail: ohmachi@enveng.titech.ac.jp

³東京工業大学総合理工学研究科（〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259）

E-mail: gotakubo@enveng.titech.ac.jp

本論文では、2004年新潟県中越地震を対象として、強震観測記録、数値シミュレーションから震源域の地表面変位を推定し、上水道管路被害と地表面変位量とを対比した。その結果、震源域では瞬間的に80cm程度の最大水平変位が発生した後、50cm程度の永久変位量が発生しており、長岡市における上水道管路は地表面変位量が大きい区域で多くの被害が発生していたことが分かった。また、地表面の動的変位は、現行設計基準の設計変位の10倍以上であったと考えられる。

Key Words : *Damage of the water supply pipeline, Near-field ground displacement,
The mid Niigata prefecture earthquake in 2004*

1. はじめに

上水道、下水道、ガス等の埋設管路の地震時の挙動は、周辺地盤の変位やひずみに支配されることが知られており、埋設管路の耐震性を検討する上では、地震時における地盤の変位やひずみを評価することが非常に重要である。

地震時の地盤ひずみは、いくつかの観測事例があるが¹⁾、大規模地震の震源域での観測記録は得られなく、震源域における地盤ひずみには未解明の部分が多い。また、地震時の地盤変位は、地震後の航空写真測量²⁾、三角点の移動量³⁾から永久変位量を求められているが、地震時の最大変位量については評価されていない点がある。

一方、埋設管路の耐震設計では、応答変位法を用いることを基本としており、地盤の変位やひずみを設計荷重としている^{4) 5)}。これらの基準は兵庫県南部地震以降、レベル2地震動の導入に伴い改訂され、設計速度応答スペクトルや液状化地盤における設計変位量が見直された。しかし、非液状化地盤における地盤変位量の算定方法については、従来と同じ手法を用いている。また、上水道管路の現行設計基準による管路の耐震計算では、地震により被害が発生している管路であっても、耐震性が高い結果となり、

実被害と矛盾することが指摘されている⁶⁾。このようなことから、現行設計基準の設計で用いる地盤変位量は適切でない可能性がある。

本研究では2004年新潟県中越地震を対象とし、地震観測記録、数値シミュレーションから震源域の地盤変位を推定し、上水道管路被害と地表面変位量との対比を行い、現行設計基準の設計で用いる地表面変位量の妥当性を検証した。

2. 新潟県中越地震による上水道管路被害

(1) 上水道管路の被害概要

2004年10月23日17時56分頃、新潟県中越地方を震源とする地震規模 $M_j=6.8$ の地震が発生した。最大震度7を記録した内陸直下の地震であり、本震に匹敵する規模の余震が数日にわたり相次いで発生した。これら一連の地震活動間により、川口町、山古志村、小千谷市を中心として、構造物、ライフライン施設が多大な被害を受けた。

他のライフラインと同様に上水道管路も多くの被害を受け、42市町村（合併前）、約13万戸に断水が発生した。長岡市における管路被害率は0.30件/km（328件/1084.4km）、小千谷市では0.31件/km

(102件/328.5km)であった⁷⁾。

なお、震源域であり、上水道の復旧に1ヶ月以上を要した川口町、山古志村については、現段階において被害実態が十分把握されていない。

(2) 長岡市における管路被害

現段階において管路被害地点が明確化している長岡市について、管路被害状況を述べる⁸⁾。

図-1 は長岡市における送配水管の管路被害位置を示しており、被害の約90%が信濃川の右岸側において、発生している。管種・口径別の被害を表-1に示しており、約70%がφ100mm以下の小口径管路で発生おり、管種別の被害では、耐震性が低いとさ

れている塩化ビニル管、ネジ継手の鋼管に多く発生している。

表-2 は管種・被害形態別の被害を示しており、全体の約50%は継手の抜けによるものである。また、ダクタイル鋳鉄管(DCIP)、普通鋳鉄管(CIP)においては、道路崩壊による被害が全体の約30%を占めている。

3. 地表面変位量の推定

埋設管路の地震被害に大きな影響を及ぼすと考えられる地表面変位量について、新潟県中越地震の強

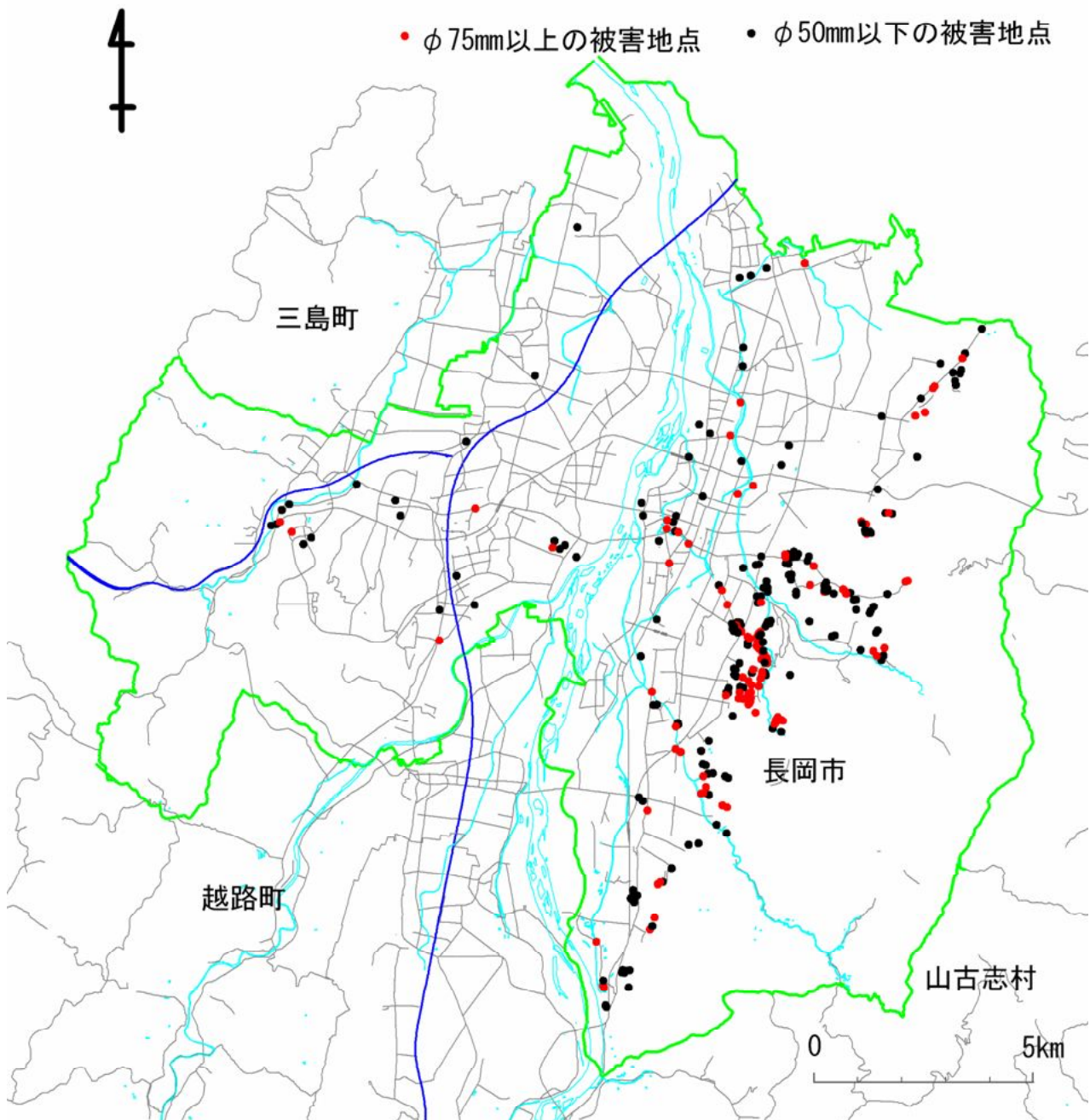


図-1 長岡市における上水道管路被害位置図

表-1 長岡市における上水道管路の口径別、管種別被害状況

管 種	口 径						布設延長 (km)	被害率 (件/km)
	～50mm	～100mm	～150mm	～200mm	250mm～	計		
DCIP, CIP		44	31	8	1	84	777.6	0.11
鋼管	40	5	2	1	24	72	73.8	0.98
石綿セメント管						0	5.6	0.00
塩化ビニル管	149	5				154	227.5	0.68
その他	-	-	-	-	-	18	不明	-
計	189	54	33	9	25	328	1084.5	0.30
布設延長(km)	251.4	467.9	154.3	69.6	141.3	1084.5		
被害率(件/km)	0.75	0.12	0.21	0.13	0.18	0.30		

表-2 長岡市における上水道管路の管種、被害形態別の被害状況

管 種	被害形態						布設延長 (km)	被害率 (件/km)
	継手抜け	フランジ	管体破損	道路崩壊	その他	計		
DCIP, CIP	41	0	9	28	6	84	777.6	0.11
鋼管	21	21	28	0	2	72	73.8	0.98
石綿セメント管	0	0	0	0	0	0	5.6	0.00
塩化ビニル管	112	0	35	3	4	154	227.5	0.68
その他	0	0	0	0	18	18	不明	-
計	174	21	72	31	30	328	1084.5	0.30

震記録及び数値シミュレーションから推定する。

(1) 強震記録から得られる地盤変位

a) 使用した強震記録

本研究では、Web 上で公開されている K-net⁹⁾、Kik-net¹⁰⁾、気象庁¹¹⁾の観測機関による合計 19 観測点における強震記録を用いて震源近傍での地盤変位を計算した。各観測点の位置を図-2 に示す。

なお、変位を求める際に積分は台形公式を用い、速度波形の基線を補正して積分することで変位波形を得ている。

b) 地盤変位量の計算結果

強震記録から得られた川口町(気象庁)における時刻歴波形を図-3 に示し、各観測点における最大加速度、最大速度、最大変位、永久変位を図-4、図-5 に示す。

川口町では瞬間的に 80cm 程度の最大水平変位が発生した後、50cm 程度の永久変位が発生したことがわかる。他の観測点も合わせると、震源域を中心として地盤変位が発生しており、特に震源ごく近傍では大きな隆起が発生した状況が推察される。

(2) シミュレーションから推定される地盤変位

a) 解析モデル

新潟県中越地震本震の断層モデルは、インバージョン解析によって様々な研究者によって提唱されている^{12)~15)}。本研究では、変位波形を用いて求めら

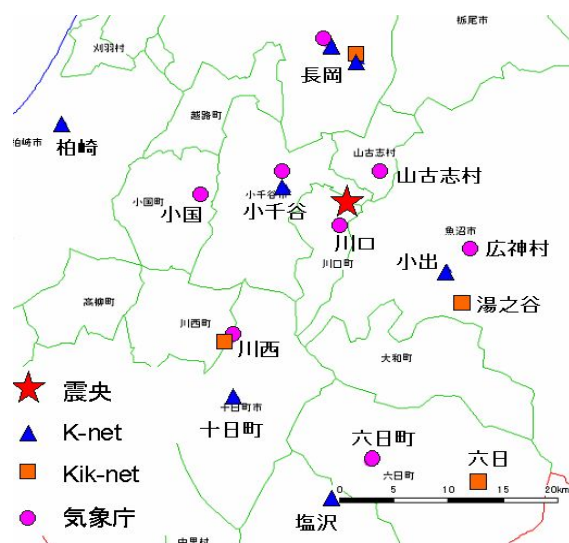


図-2 強震記録観測点の位置

れた国土地理院の断層モデルを用いることとした。ただし、すべり量については、国土地理院のモデルでは一定とされていたが、他の断層モデルも参考にし、すべり量分布を独自に変更した。図-6 に数値シミュレーションに用いた断層モデル及びすべり量分布、表-3 に断層パラメータを示す。

地盤速度構造については、山中・元木¹⁶⁾による小千谷における基盤の S 波速度の推定値を用いて $V_s=3.4\text{km/s}$ とし、P 波速度については、数値計算において弾性体としていることから、 $V_p=\sqrt{3}\cdot V_s$ として設定した。

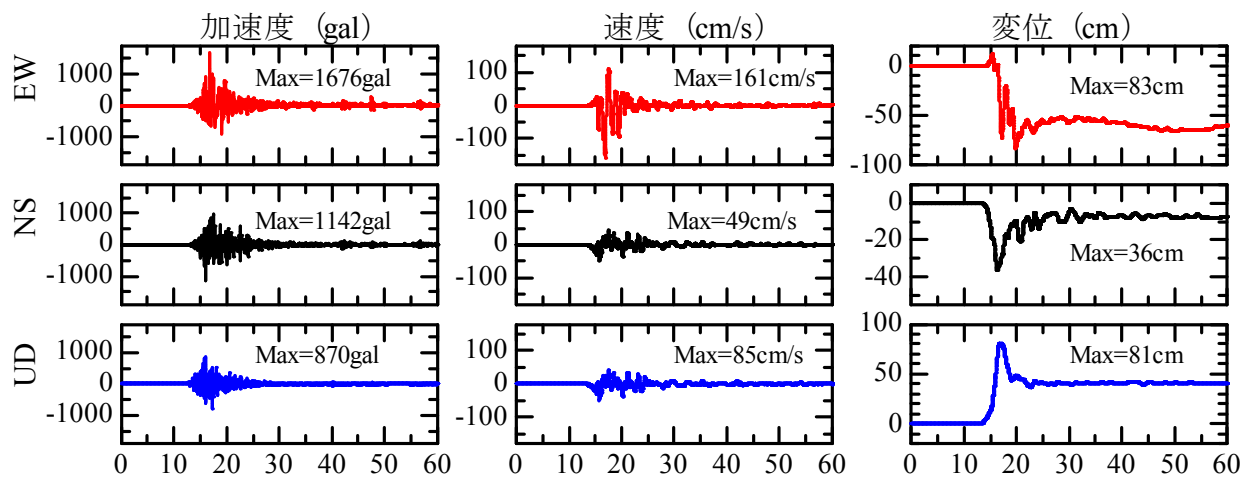


図-3 川口町の強震記録による波形

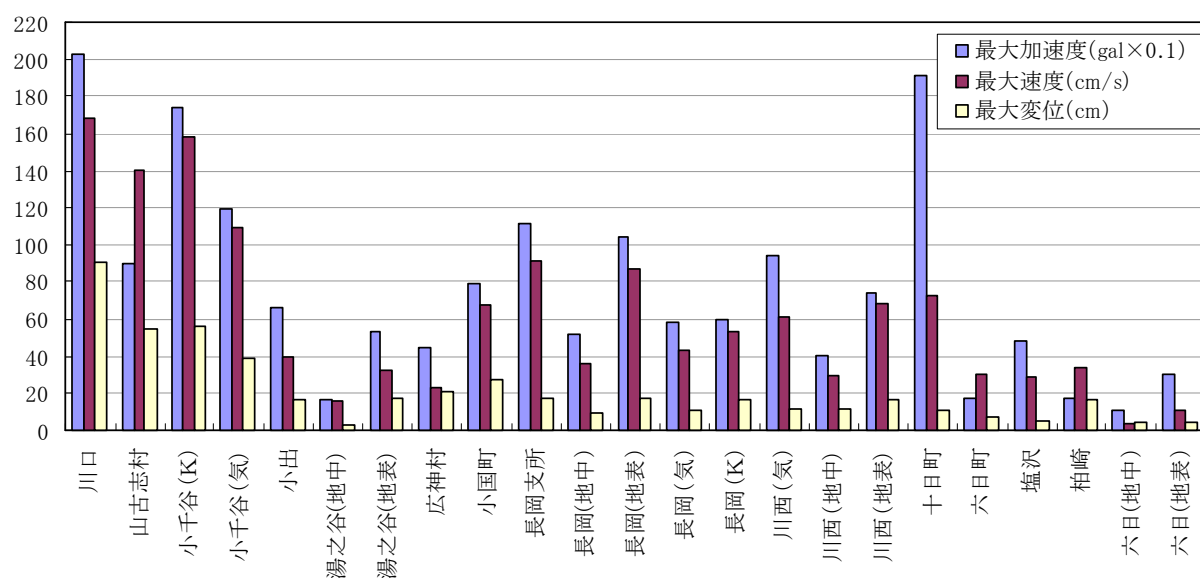


図-4 各観測点での各成分の合成値の最大加速度，最大速度，最大変位

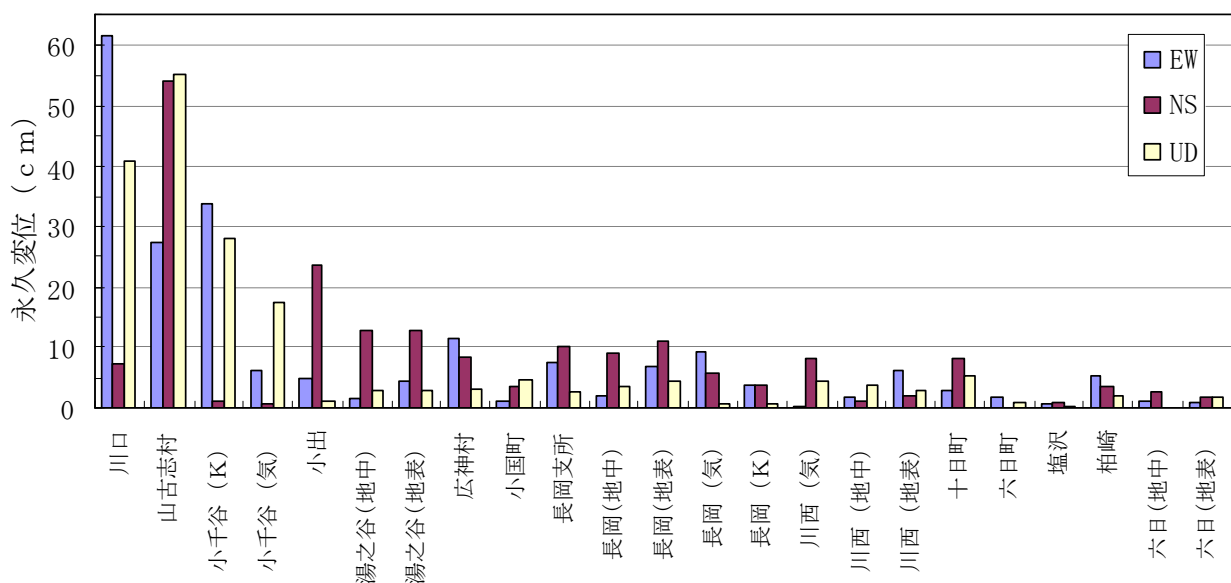


図-5 各観測点での永久変位量

表-3 数値シミュレーションに用いた断層パラメータ

走向 Strike (度)	傾斜 Dip (度)	すべり角 Rake (度)	断層長さ L (km)	断層幅 W (km)	上端深さ (km)
210	53	92	21	12	3
P波速度 V_p (km/s)	S波速度 V_s (km/s)	ライズタイム (s/m)	破壊伝播速度 (km/s)	最大すべり量 D (m)	平均すべり量 D_{max} (m)
5.9	3.4	1	2.3	1.8	1.14

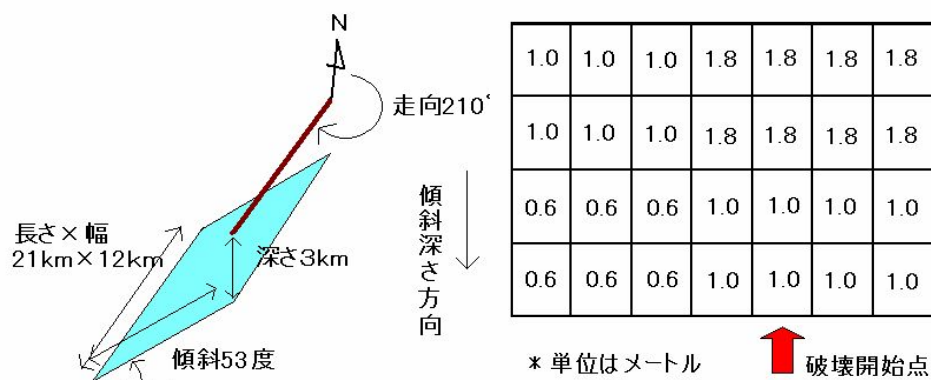


図-6 断層モデル及びすべり量分布

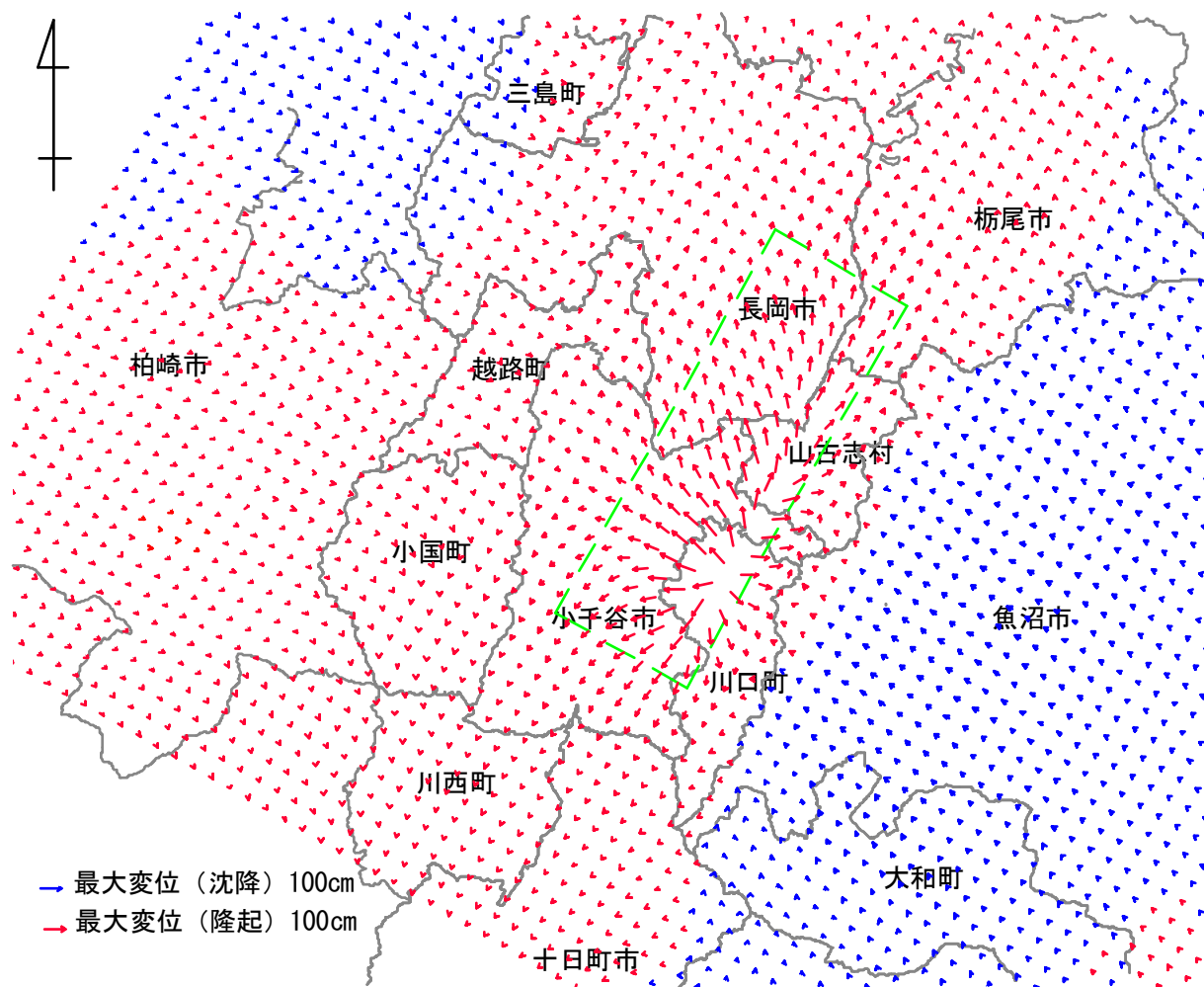


図-7 数値計算による最大変位分布

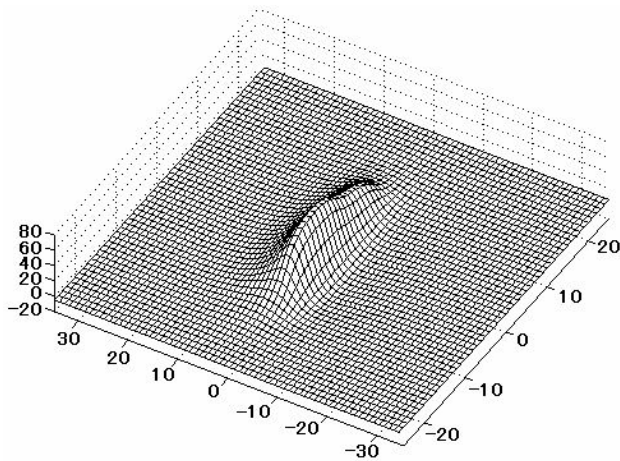


図-8 数値計算による永久変位分布（鉛直変位）

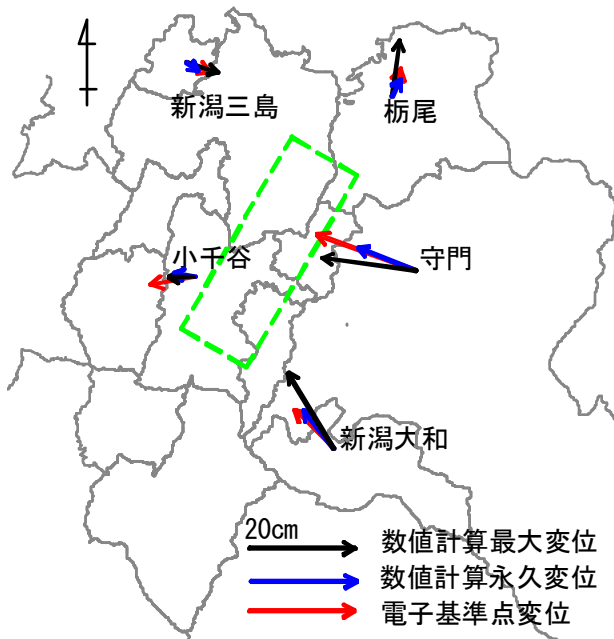


図-9 数値計算による変位量と電子基準点変位量

表-4 K-NET 観測地点における地表面水平変位量

K-NET 観測 地点	表層地盤		設計 変位量 (cm)	強震記録変位量 (cm)		
	層厚 (m)	Vs (m/s)		最大 変位	動的 変位	永久 変位
小千谷	4	100	0.5	61.7	26.5	35.2
長岡	4	100	0.5	18.5	4.8	13.7
小出	5	116	0.6	33.0	8.8	24.2
十日町	4	165	0.3	20.6	11.9	8.7

b) 解析結果

図-7 は解析によって得られた最大変位量分布を示しており、図中央の矩形が断層面位置を示している。図-8 は、永久変位の鉛直成分を示しており、川口町、山古志村などの断層面上で、局所的に大きな隆起があったことを示している。

c) 観測値と解析結果の比較

国土地理院により、本震前後の基準点変位量が公開されている。電子基準点はリアルタイムの座標値

に基づいているため、本震による地盤変動を精度良く表しているものと考えられる。

解析領域には電子基準点が5箇所設置されており、最大20cm（守門）の永久変位量が観測されている。図-9 は電子基準点の変位量観測値¹⁷⁾と電子基準点付近の数値シミュレーションによる最大変位量及び永久変位量との比較を示す。数値シミュレーションにおいては、地盤を半無限弾性体としてモデル化しており、堆積層による影響を考慮していない。全ての観測地点で、解析結果が観測値より小さな永久変位量となっているのは、そのためと思われる。変位方向については、解析結果と観測値がほぼ同じとなっている。

4. 上水道管路被害と地表面変位量との対比

(1) 長岡市での事例

長岡市における上水道管路の被害位置、斜面崩壊位置及び数値シミュレーションによる地表面最大変位量を図-10 に示す。上水道管路の被害は信濃川の右岸側において多く発生しており、右岸側の最大変位量（平均値23cm）は、被害の少ない左岸側（平均値9cm）に比べて2.5倍大きい。

詳細な管路被害要因を分析するためには、液状化分布、地形条件、埋設管の管種・口径等の影響についても考慮する必要があるが、長岡市における上水道管路の被害の傾向としては、地表面変位量の大きさが影響しているものと考えられる。

(2) 現行設計基準の設計変位量との比較

現行設計基準の設計変位量を強震記録観測点における観測変位量と比較してみる。

a) 設計基準の変位量計算式

上水道管路の耐震設計に用いる地盤変位量は、式(1)より算定することが基本とされている¹⁸⁾。

$$Uh = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (1)$$

ここで、

Uh: 深さ z における地盤変位量 (cm)

S_v: 基盤地震動の設計速度応答スペクトル (cm/sec)

T_G: 表層地盤の固有周期 (sec)

Z: 地表面からの深さ (m)

H: 表層地盤厚さ (m)

式(1)では、Vs ≥ 300m/s以上の地盤を工学的基盤とおり、以下のような仮定により表層地盤を理想化している¹⁹⁾。

- ① 表層地盤を単一地層に置換した一様地盤と見なす
- ② 表層地盤の1次の振動モードのみを考慮

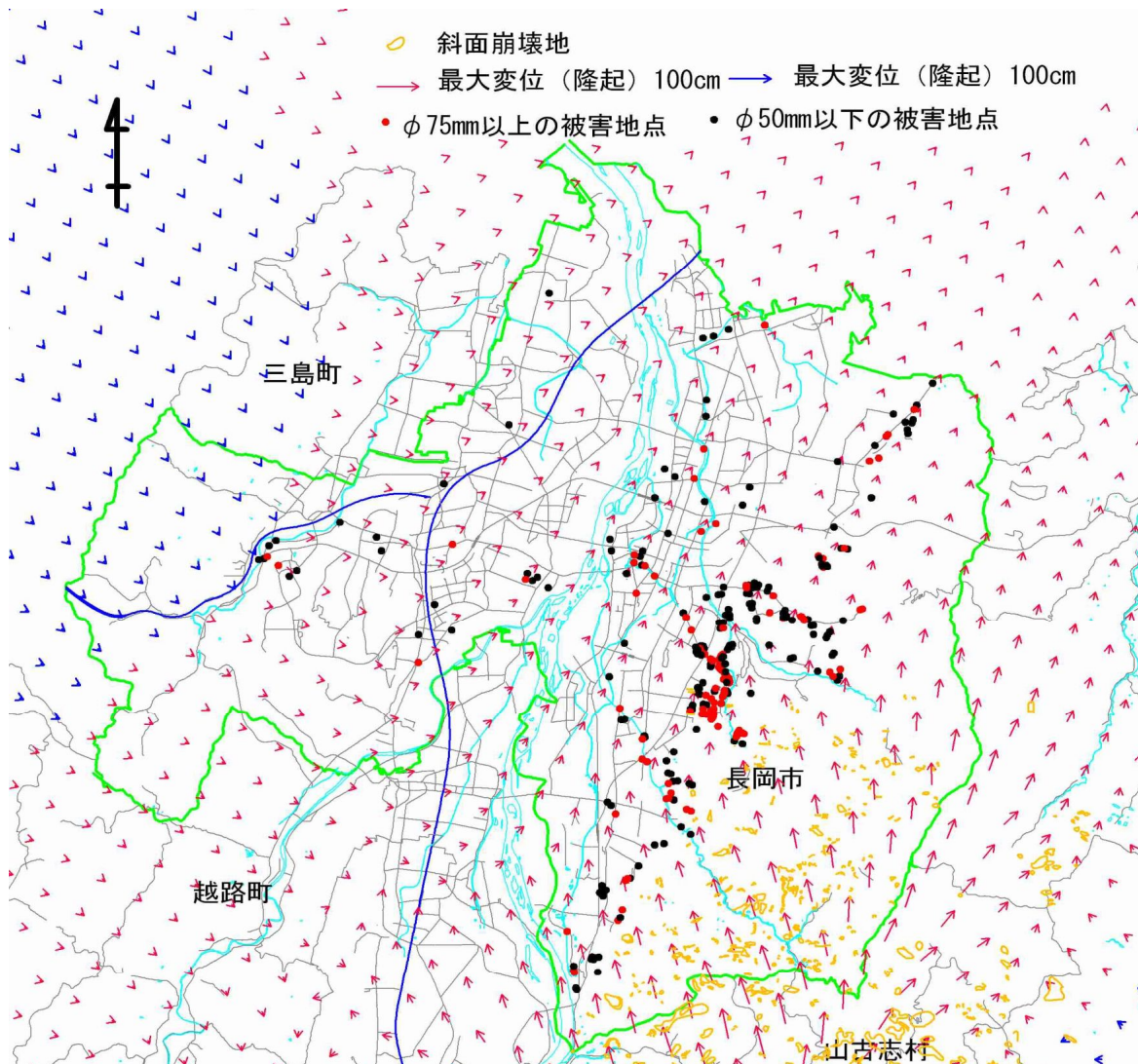


図-10 長岡市における上水道管路被害と最大変位量分布

b) K-NET 観測地点における地表面変位量

強震観測地点の地盤情報が公開されている K-NET の観測地点を対象とし、式(1)を用いて設計基準で求められる地表面変位量を算定した。設計基準による地表面変位量の計算値、及び強震記録から求められる地表面変位量を表-4 に示す。

強震記録の変位量は NS, EW 成分の合成値であり、最大変位量と永久変位量の差を動的変位量としている。設計基準による変位量は 0.3~0.6cm であるが、強震記録の動的変位量は 4.8~26.5cm であり、設計基準による変位量に比べて 10 倍以上大きい。

- (2) 長岡市の上水道管路は、地表面変位量が多い区域において被害が多く発生していた。
- (3) 新潟県中越地震による地表面の動的変位は、上水道管路の現行設計基準の設計変位の 10 倍以上であったと考えられる。従って、現行設計基準の見直しが必要である。

今後は、過去の地震における震源域における変位量についての検討を行い、地中管路の設計変位量の合理的な設定方法を提案していく予定である。

5. 結論

本論文では、新潟県中越地震における上水道管路被害を整理するとともに、強震観測記録及び数値シミュレーションにより震源域における地表面変位量を推定した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 新潟県中越地震による震源域においては、地表面最大変位量が 80cm 程度が発生し、60cm 程度の永久変位量 60cm が発生したと推測される。

参考文献

- 1) 例えば、森地重暉，今村芳徳，高野工，小田幸平：地震時に生じる地盤ひずみの観測とその結果についての考察，土木学会論文集，No.570/I-40,pp259-275,1997
- 2) 例えば，防災科学研究所：1995年兵庫県南部地震による地表面変位量図附図 垂直方向の等変位量線図水平方向の地表面変位量図,1996
- 3) 例えば，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,共通編2巻,pp124-136,1998
- 4) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，pp17-18，1997.
- 5) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，

- pp21-33, 2000.
- 6) 大嶽公康, 市川浩: 地震被害と現行指針の水道管路耐震設計法に関する一考察, 日本地震工学シンポジウム論文集, vol. 11, pp.1051-1054, 2002年
 - 7) 厚生労働省: 新潟県中越地震水道被害調査報告書, 2005
 - 8) 前出7)
 - 9) 防災科学技術研究所K-net, <http://www.k-net.bosai.go.jp>
 - 10) 防災科学技術研究所Kik-net, <http://www.kik.bosai.go.jp>
 - 11) 気象庁: 平成16年(2004年)新潟県中越地震に関する各種資料等
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2004_10_23_niigata/index.html
 - 12) 国土地理院: 新潟中越地震関連ページ
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/NIIGATAJISIN/>
 - 13) 産業技術総合研究所
<http://staff.aist.go.jp/h.horikawa/2004Chuetsu/source.html>
 - 14) 東京大学地震研究所: 2004年新潟中越地震の特集ページ
<http://www.eri.u-okyo.ac.jp/topics/CHUETSU2004/index-j.html>
 - 15) 防災科学研究所,
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/niigata041023/>
 - 16) 山中浩明, 元木健太郎: 2004年新潟県中越地震の震及び微動の観測, 日本地震工学会 平成16年 新潟中越地震被害調査報告会 梗概集, pp35-38, 2004
 - 17) 前出12)
 - 18) 前出4)
 - 19) 川島一彦: 地下構造物の耐震設計, 鹿島出版会, pp31-33, 1994.

(2005.3.15 受付)

DAMAGE OF THE WATER SUPPLY PIPELINE AND GROUND DISPLACEMENT IN NEAR-FIELD DURING THE MID NIIGATA PREFECTURE EARTHQUAKE

Kimiyasu OHTAKE and Tatsuo OHMACHI and Gota KUBO

In this report, the ground displacement was estimated from the record of the strong motion observation and the numerical simulation for the mid Niigata prefecture earthquake in 2004, and the damage of the water supply pipelines and the estimated ground displacement were compared.

As the result, it was found that the maximum, horizontal displacement of approximately 80cm had been momentarily generated in the Near-field before the permanent displacement of approximately 50cm was generated. Moreover, it is thought that the dynamic displacement of the ground level was more than ten times larger than the design displacement of the seismic design codes.