



斜面地形による水道管路被害への影響評価 ～2004年新潟県中越地震の管路被害分析～

鍬田泰子¹⁾、高田至郎²⁾、勤息義弘³⁾、Javanbarg Mohammad Bagher⁴⁾

1) 正会員 神戸大学工学部建設学科、助手 博士 (工学)

e-mail : kuwata@kobe-u.ac.jp

2) 正会員 神戸大学工学部建設学科、教授 工博

e-mail : takada@kobe-u.ac.jp

3) 非会員 神戸大学大学院自然科学研究科、大学院生 学士

e-mail : 043t117n@y04.kobe-u.ac.jp

4) 非会員 神戸大学大学院自然科学研究科、大学院生 MS

e-mail : 032d842n@y05.kobe-u.ac.jp

要約

地震時における地中管路は、地盤波動だけでなく、地すべりや液状化に伴った地盤変状による被害を十分考慮した上で、事前対策をとることが重要である。本稿は、新潟県中越地震における水道管路被害の分析を行った。とくに、山間地での地盤変状の原因となる地震動と地形条件に着目した。本地震における管路被害の多くは、地震動が高く、斜面地形において地盤変状が引き起こされることにより発生していることが分かった。さらに、既往の管路被害予測式を用いて斜面地形が及ぼす影響について検討した。

キーワード： 地盤変状、管路被害、地形条件、新潟県中越地震

1. はじめに

地震時の地中管路は、地盤波動の他に、地すべりや液状化、断層変位などに伴った地盤変状によって被害を受ける。地中管路の耐震設計では、応答変位法に基づいて地盤波動の伝播によって引き起こされる軸および曲げ応力を求め、主として管の許容応力に対する安全性照査を実施することを規定している。しかし、過去の地震被害事例からみても、多くの管路被害は大きな地盤変状が発生する地域に集中することから、地中管路の地震外力には地盤波動だけではなく地盤変状も十分に考慮する必要がある。兵庫県南部地震以降、高圧ガス導管の耐震設計指針には、地盤波動の他に液状化による側方流動や地盤沈下などの地盤変状を考慮した液状化耐震設計も追加された¹⁾。高圧ガス導管耐震設計指針²⁾では、レベル2地震動を算出する際に断層を配慮した設計方法が示されている。また、断層運動に伴った表層地盤変位を受ける管路挙動については、数値解析を用いた種々の検討が進められている³⁾。その一方で、地すべり等の地盤変状については、水道施設耐震工法指針では人工改変地盤における地盤永久ひずみとして1.7%をとることが示されている。米国の American Lifeline Alliance⁴⁾では、管路の地震安全性評価法の中の外力に、地盤波動の他に液状化や断層、地すべりなどの地盤変状が加えられている。地すべりによる評価方法は、性能設計に基づいて管路の性能レベルに応じた水平地盤変位を規定している。この水平地盤変位は、地震動強度のほか斜面の傾斜角度や斜面安定係数から算出されるものである。日本におい

ても、地すべりに対する地中管路の挙動や過去の被害事例を検討した上で、詳細な設計手法を構築することは重要である。また、既に埋設されている管路については、精度よい被害予測手法によって事前対策を実施することで対応することが期待される。

本稿では2004年10月23日午後17時56分に発生した新潟県中越地震における長岡市・小千谷市の管路被害について分析を行う。とくに、地震動と地形条件による管路被害への影響を明らかにする。この種の分析は、過去の地震被害についても実施されている。磯山ら⁵⁾は、兵庫県南部地震における兵庫県西宮市の管路被害を数量化I類で分析をして被害推定式を構築しているが、この分析の中で切土斜面、土石流堆、人工山地などの改変山地や段丘では、一般の沖積平地の地形区分よりも1.1~1.5倍も管路被害が発生しやすいことを示している。しかし、この研究では改変山地における管路敷設延長が短かったため、当地形区分の影響が十分に反映されていない。一方、新潟県中越地震では、激震の被災地が山間地にあつたために、斜面崩壊や地すべり、地盤変状によって道路損壊ならびに多くの管路被害が発生した。地震発生前に台風の影響で降雨量が多かったことも、地盤崩壊や変状によって被害を増大させた原因であると考えられている。本研究では、山間地における管路被害データから斜面地形による影響を示し、既往の管路予測式に適用可能な斜面地形の補正係数を導出する。

2. 長岡市における管路被害分析

新潟県長岡市では、新潟県中越地震によって妙見浄水場で地盤沈下や配管類の損傷、水質検査機器等の破損が発生した。しかし浄水施設など主要設備・構造物に大きな損傷はなく、非常用電源の稼働により10月23日中には運転を再開した。また3箇所の配水池には阪神・淡路大震災以降に緊急遮断弁が設置されており、地震後に有効に作動し、配水池に水を確保できた。配水池からは配水し続けたが、消火用水確保のため、市の約10.4%である70,000世帯が断水となった。主要配水池の水量が回復すると高台地区を除きほぼ復旧したが、管路損傷の大きい川東高台地区は断水が続き、完全復旧には約1ヶ月を要した。

長岡市の水道管路の敷設延長は約1,100kmであり、全体の37%が口径φ75mm以下、57%が口径φ100~350mm、6%が口径φ400mm以上の管路構成になっている。また管種では、ダクタイル鋳鉄管の延長が長く、全体の66%以上(710.9km)にもなる。とくに、口径φ75mm以上の管路では85%がダクタイル鋳鉄管である。このダクタイル鋳鉄管の継手は、ほとんどA形、K形継手であるが、約2.5kmの延長でNS形、SII形の耐震継手のダクタイル鋳鉄管が埋設されている。

管路被害件数の一覧を表1に示す。ダクタイル鋳鉄管の主な被害は、地盤変状に伴った継手の抜けによるものであった。また、管路被害は小口径のVP管に集中している。小口径の管路は埋設深さが浅く、地震動や地盤変状の影響を受けやすいためと考えられる。とくに、本地震による管路被害の特徴として、

表1 口径・管種・被害形態別被害件数

		DIP・CIP	SP	ACP	VP	その他	計	管路延長(km)	被害率(件/km)
口径	< φ 50	0	12	0	75	0	87	251.4	0.75
	φ 50	0	28	0	74	0	102		
	≦ φ 100	44	5	0	5	0	54	467.9	0.12
	≦ φ 150	31	2	0	0	0	33	154.2	0.21
	≦ φ 200	8	1	0	0	0	9	69.6	0.13
	> φ 200	1	24	0	0	0	25	141.3	0.18
計		84	72	0	154	18	328	1084.4	0.30
管路延長(km)		777.6	73.8	5.6	227.5		1084.4		
被害率(件/km)		0.11	0.98	0.00	0.68		0.30		

長岡市水道局の資料(平成16年11月14日現在)

道路崩壊に伴って管路が流されたもの、道路に亀裂が入り、地盤の沈下や道路のり面のはらみ出しにより継手が抜け出したものが挙げられる。これらの被害要因を分析するために、GIS上で管路、被害箇所、震度、地形条件のデジタルデータを構築した。水道管路網と管路被害箇所については、長岡市水道局より提供していただいた資料に基づいて作成している。紙ベースの被害地図より被害位置データを構築したために小口径管路で表1の報告よりも若干誤差があるが、本研究では合計310件の被害箇所数で分析を行った。ラインデータとして入力した管路網は口径150mm以上の管路である。また、口径125mm以下の小管路の敷設延長は、対象地区の敷設延長がその地区の人口に比例すると仮定して推定したものである。この仮定は、口径150mm以上の管路が長岡市内の一般道路上にあることから、口径125mm以下の管路は各世帯に配水している枝管に相当すると考慮したに基づいている。GISを用いた分析は、1km四方のメッシュごとに行った。図1は水道管路網と管路口径別の管路被害箇所と被害確率を示している。口径がφ150mm以上の管路では被害が東側の山沿いに局所的に集中している。小口径である口径φ125mm以下

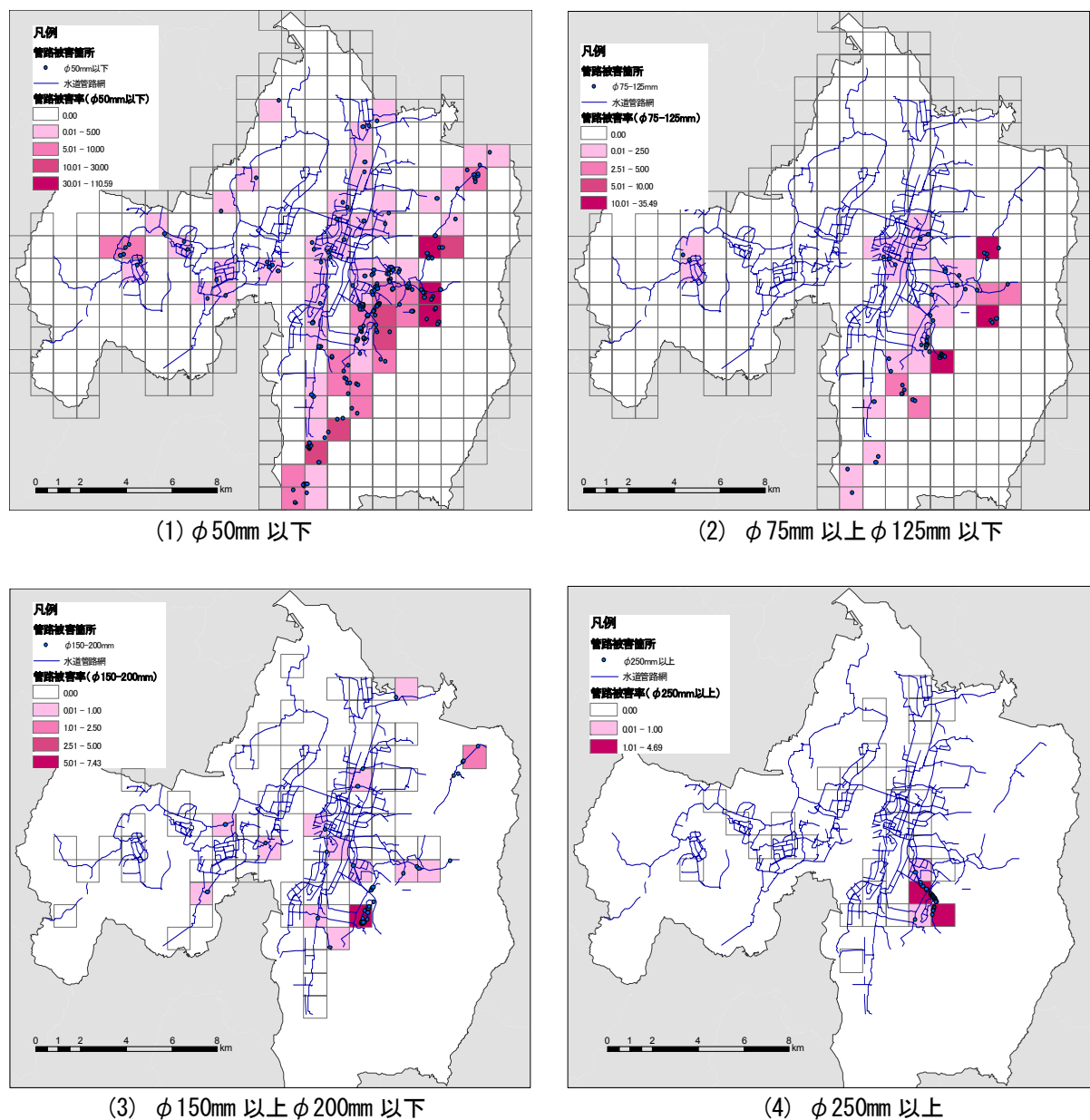


図1 管路口径別の管路被害率（件/km）

の管路では、市内中央に流れる信濃川の西側にも分散して市内全体に被害が発生している。また、市内東側にある斜面に沿って、被害率が高くなる。これは、いずれの口径の被害率分布でも同様の傾向がある。

地形は、国土地理院の地形分類図に基づいて8分類に区分した。図2は長岡市の水道管路網と管路被害箇所、地形区分を示している。震度は、形状補間法を導入して観測された最大加速度値から推定したものである。形状補間手法は、地震動の観測位置を節点として評価対象地域を包含するように四角形を形成させて、離散的な数値で与えられた節点間の数値を連続関数として補う手法である⁶⁾。ただし、観測点が一般に同種の地盤条件ではないために、一度地表面での最大加速度値を増幅率で除して工学的基盤面の値に戻し、基盤面上で補間したのち、基盤面上での補間値に任意地点の表層地盤の増幅率を考慮して地表面での最大加速度を推定した。防災科研のK-NETや北陸ガスによって長岡市内で観測された最大加速度値の観測位置を節点として、水道管路網を包含するように2つの四角形を形成させた。四角形の外側にある管路場所での最大加速度値は四角形内で構築された連続関数に従って推定される。工学的基盤は、長岡市内の地盤断面図⁷⁾とそのN値を用いて道路橋示方書⁸⁾で規定される工学的基盤に基づいて決定した。また、地盤の増幅率は、地盤断面図を参考にして硬・普通・軟弱の地盤モデルを作成し、重複反射理論を用いて本地震で観測された地震動波形による工学的基盤面と地表面の最大加速度値の応答比から算出した。増幅率の値は、硬地盤で1.2程度、普通地盤で1.4、軟弱地盤で1.7である。さらに、著者ら⁹⁾によって得られている計測震度と最大加速度の関係(式(1))を用いて、推定した最大加速度から計測震度を推計した。

$$I = 0.8544 \ln(PGA) + 0.7281 \quad (R = 0.977) \quad (1)$$

ただし、I：計測震度、PGA：最大加速度(gal)

図3は補間推定に用いた加速度観測点のネットワークと推定震度を示している。口径φ150mm以上の管路網に対して地形と震度の要因のクロス集計した管路被害率を図4に示す。地形区分で緩斜面と崖に区分された地域では、他の地形区分よりも極端に大きな被害率であることが分かる。これらの地域では敷設延長が他の地形区分に比べて短かったことも挙げられるが、緩斜面地形では18件(口径φ150mm以上の全被害件数の26%)の管路被害が発生している。

そこで、地形の中でも緩斜面・崖地形が被害を増大させる要因であると考え、メッシュ内に緩斜面と崖地形を含むメッシュを区別して、口径φ75mm以上の管路を対象にメッシュ毎の管路被害率を算出し

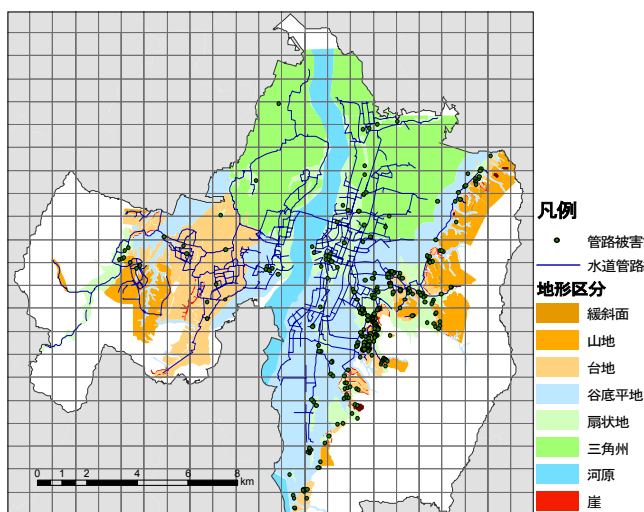


図2 管路被害箇所と地形区分

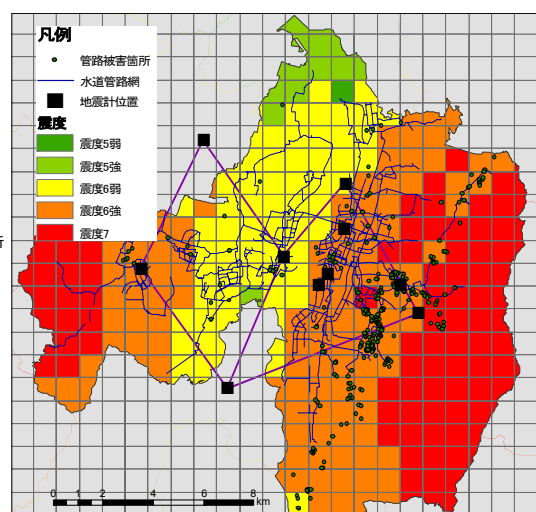


図3 補間ネットワークと推定震度

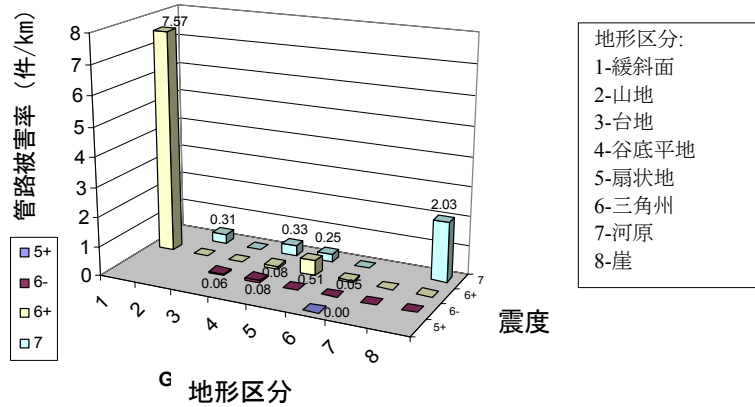


図4 震度・地形区分別の管路被害率（件/km）

た。ただし、山間地などでメッシュあたりの敷設延長が極端に短く、1kmあたりの被害件数で大きく評価されることを避けるため、口径φ150mm以上の管路の敷設延長がメッシュ内に1km以上あるメッシュのみを評価対象とした。また、φ75mm以上の管路は85%以上がダクタイル鋳鉄管であることから、この管種の被害率分析であるとみなせる。図5は地形条件で分けた場合の震度と被害率の関係を示す。緩斜面・崖地形を含まない地域では、震度が大きくなるにつれ管路被害が発生しているが、震度が6.5以上であっても被害が生じない地域もある。一方で、緩斜面・崖地形を含む地域では、震度が6.2を超えると被害率が急激に大きくなる。また、緩斜面・崖地形を含まない地域での被害率は0.5件/km以下の値になっており、緩斜面・崖地形を含む地域での被害率と異なる。被害率が非常に大きい地域では、管路被害が局所的な地盤の亀裂や変状に伴って管路や継手が数mに亘って管路被害が発生した地域と重なる。したがって、地震動がある程度大きくなると、後者の地形条件では地盤変状が発生しやすくなり、この地盤変状が管路に被害をもたらしたことが言える。一方、平地では、地震波動が管路被害の主な原因となり、一箇所ですべての管路被害が発生すれば、そこで応力が開放されて隣接管路にひずみが伝播されないために、管路被害率がある値以上にはならないと考えられる。

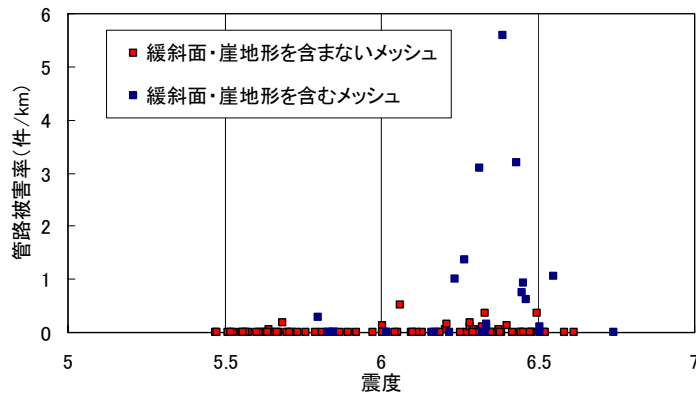


図5 緩斜面・崖地形別の震度と管路被害率との関係（口径φ75mm以上）

3. 小千谷市における管路被害分析

小千谷市ガス水道局は、近年いくつかに分かれていた簡易水道を統合して、一連の上水道システムにかえた。水源は、信濃川表流水で、取水場は小千谷市市街地の北側に位置している。小千谷市ガス水道局における導・送・配水管の総管路延長は328.5kmである。管種では、耐震継手のあるダクタイル鋳鉄

管はなく、ダクティル鉄管（耐震継手を有しない：A形、K形）の敷設延長がもっとも長く全体の約70%を占めている。また、口径もφ100mm以下の小口径管が67%を占めている。

表2に小千谷市ガス水道局で集計(平成16年11月15日現在)された口径・管種別の被害件数を示す。小千谷市ガス水道局では、導・送・配水管に合計102件の被害が生じた。ダクティル鉄管の被害率が0.17件/kmであるのに対し、小口径ねじ継手鋼管の被害率が0.79件/km、硬質塩化ビニル管の被害率が0.67件/kmと大きい。口径別にみると、φ40、50mmの管路で被害率が0.69件/kmと高い値となっている。管路の被害は、長岡市と同様で、継手の抜けによるものが多い。

表2 口径・管種別被害件数

		DIP	SP	VP	PE	計	管路延長(km)	被害率(件/km)
口径	< φ40	0	0	0	0	0	1.0	0.00
	≦ φ50	0	31	15	1	47	68.6	0.68
	≦ φ100	22	8	5	0	36	188.0	0.19
	≦ φ150	9	2	0	0	11	70.7	0.16
	≦ φ200	4	0	0	0	4	18.9	0.21
	> φ200	3	0	0	0	3	17.8	0.17
	その他	1	0	0	0	1		
計		39	41	20	1	102	328.5	0.31
管路延長(km)		234.4	51.8	29.9	12.4	328.5		
被害率(件/km)		0.17	0.79	0.67	0.16	0.31		

長岡市と同様に、小千谷市水道局より提供していただいた管路被害箇所図と管路網図をもとにGISでデータベースを構築した。管路網は、小千谷市水道局から得た主要な配水網地図から作成したため、管路延長と比較すると全ての管路網が得られているわけではない。図6は、被害の分布図を示している。管路被害は市街地の南西部に集中しており、南北の帯状に広がっている。また、小千谷市の北部でも一部の地域で被害が集中している。被災地域の中では、水田地帯であるために地下水位が高く、その周辺に盛土を建設して管路を埋設した場所では、盛土の沈下、流動などによる被害がみられた。また、新興住宅地周辺では、埋め戻し土が緩く、地震動によりそれらが液状化したために路面が沈下して管路に被害が出た地域も多く見られた。また、地形が急激に変わる地域でも被害が発生している。ガス水道局職員の話によると、山間地で被害の集中している地域には、知名に「水」に関する文字が使われており、昔から地下水位が高く、沼地であった地域や山水が得られる地域であるといわれている。

また、水道管路の被害発生箇所のうち48件(47%)で道路被害に伴った被害である。被害の概要は、道路が陥没した場所での被害が25件、隆起した場所での被害が13件、割裂した場所での被害が7件である。本地震では、主要国道・県道が寸断されて、復旧活動に大きな支障を与えた。小千谷市内でも、東部の河川沿いに多く国道の被害が見られた。しかし、図6の水道管の被害箇所分布と比較すると、国道などの主要道路が損壊した地域には水道管が埋設されておらず、それらによって甚大な被害を受けたものは少なかった。

小千谷市においても、長岡市と同様にGISを用いて地震動と地形と分析を行う。小千谷市では加速度観測点の欠如により管路網を包括するネットワークの形成が難しいことから、アンケートによる震度推定法を適用した。アンケート調査では、小千谷市教育委員会および各小学校の協力を得て、小千谷市内の13校の小学校児童にアンケートを配布し、児童の父兄を回答者の対象としてアンケート震度調査を実施した。全校児童数の多い小学校では5、6年の高学年児童を対象とし、児童数の少ない小学校では全児

童の世帯数が回答数となるように配布した。調査時期は、2005年11月末から12月中旬である。本アンケート震度の調査票は著者らにより提案されている修正アンケート震度¹⁰⁾を用いた。回収したアンケート回答数は553枚であり、回答者の住所から対象地点が明確に特定できたものは476枚であった。また、本アンケート調査実施前に、本アンケートの推定精度を検証するために、新潟市、長岡市、小千谷市内にあるK-NETの地震計の周辺住民を対象にアンケートを行った。加速度観測記録から算出された計測震度と周辺住民のアンケートから得られた震度は、0.1~0.3ポイント程度誤差が生じたが、ほぼ精度よく推定できることを確認している。本研究ではさらに、小千谷市全域で行われたアンケート調査から算出されたアンケート震度の結果を用いて、市街地図から得られた集落ごとのアンケート震度を算出した。ここでは、対象地点が明確に特定できた476枚のアンケートを用い、その地点を包含する集落、あるいはもっとも近い集落を割り出し、集落ごとに震度の平均値を推定した。一つの集落は平地である市街地を除いては、非常に狭い範囲であるため、集落内では、同じ地盤、地形条件であるとみなした。ある集落での震度の頻度分布は、正規分布となると仮定して標準偏差 σ と平均値 μ を算出し、平均値から 2σ 以上離れたサンプルは除外した。しかし、集落内でのばらつきはそれほど大きくなく、標準偏差にして0.19~0.68程度であったため、同じ集落内におけるサンプルの精度も妥当であると考えられる。このような分析過程により得られたアンケート震度分布が図7である。震源に近い南部地域で6強~7、市街地から北の地域は6弱~7となっている。南部地域では、信濃川を挟んで震度に差があり、川の西側では震度7、東側では6強となっている。北部において数箇所震度7の集落が見られるが、これらの地形は人工地形である平坦化地や自然堤防の地域となっており、地盤特性が影響しているといえる。図6の管路被害が発生した箇所と図7で震度が高かった地域の分布は、ともに市街地南西部から南部地域にかけての南北の帯にあり、ほぼ一致していることが示された。また、小千谷市北部で唯一被害が発生している地域についても震度が7となっており、震度と水道管路の被害分布が概ね一致していることがわかる。管路被害場所とその場所での集落の震度との関係を分析した結果、管路被害は、震度7の地域で30件、6強の地域で62件、6弱の地域で9件となった。

さらに、新潟県中越地震復旧・復興GISプロジェクトのホームページ¹²⁾に掲載されている土砂災害の状況図を参照とし、管路被害とその付近で発生した土砂災害(地すべり、崩壊地を含む)との関係について分析した。この土砂災害は、斜面の一部や全体が移動することによる地盤被害であり、一方、前述している地盤変状は斜面そのものの移動の他、自然地盤・人工構造物(盛土、埋立地盤など)の亀裂、

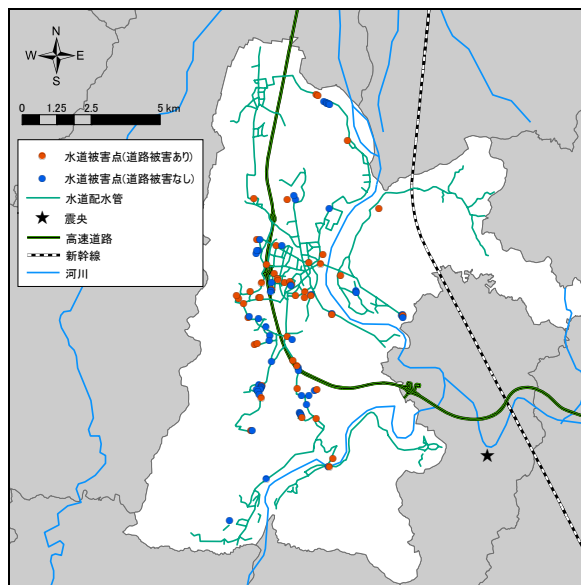


図6 水道配水管の被害発生箇所

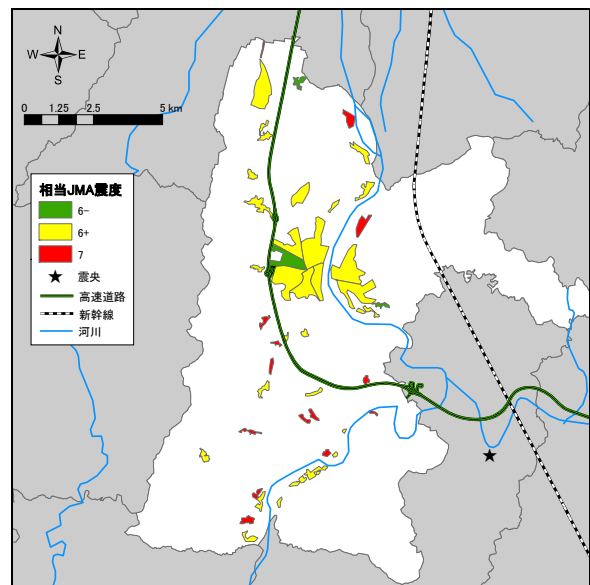


図7 震度分布図

隆起、流動、沈下などによるもので、変形量は大規模な斜面災害と比べ小さいが、永久的な地盤の変形として比較的広い意味をもつものであるとして、本研究では取り扱っている。さて、管路被害場所のうち、土砂災害が付近で発生し、管路被害と関連していると考えられるものは、震度7の地域で3件、6強の地域で13件、6弱の地域で4件となった。

次に、集落を含む町丁目別の管路被害率を算出し、その値と集落のアンケート震度値との関係を図8に示す。本分析では、詳細な配水管延長のデータがなく各町丁目における明確な値を得ることができないため、配水管延長はその地域の世帯数に相関があると仮定し、総敷設延長に対して集落の世帯数で比例配分して集落における管路延長を推定した。とくに、小千谷市では口径φ100mmの管路が送配水管路に使用されていることが多いことから、口径φ75mm以下の小口径管のみを対象に行った。さらに、土砂災害が関連していると考えられる管路被害が発生した集落についても区別した。また、長岡市の管路被害分析で斜面地形が管路被害を増大させていたことから、集落内に斜面地形を含むものも区別した。この区別は、集落の周辺の市街地図上にある等高線の粗密から判断したもので、集落の一部地域にも等高線の密度が高いものは集落内に斜面地形を含むとした。本図から、震度7の地域では管路被害率が高い地域が多く、震度6強に相当する地域についても、地震動の高い地域で管路被害率が高くなっている。土砂災害に関連した管路被害が発生した集落は5地域あり、震度6強で4地域、震度6弱の地域で1地域であった。5地域のうち、2地域では、管路被害の割合が大きいくことが分かる。この2地域はいずれも市街地の南の山間部の集落である。この2地域では、地震動に加え、土砂災害の影響により管路被害の割合が高くなった可能性が考えられる。また、斜面地形を含む集落の管路被害は、それ以外の集落の管路被害よりも全体的に高くなることが分かる。とくに、震度6.3を超えた付近から斜面地形による影響が顕著に現れる。これは、長岡市においてもみられた傾向と同じである。斜面地形の影響で、強震動が誘因となって地盤変状を引き起こしたために、被害件数が急激に高くなったものと考えられる。また、長岡市の震度と管路被害率との関係と比較すると、小千谷市の方が比較的管路被害率が高くなっている。これは、長岡市で口径φ75mm以上の口径を対象に行ったものに対して、小千谷市では口径φ75mm以下の管路が対象であった。小口径の方が脆弱であるために、全体に高くなったとも考えられる。

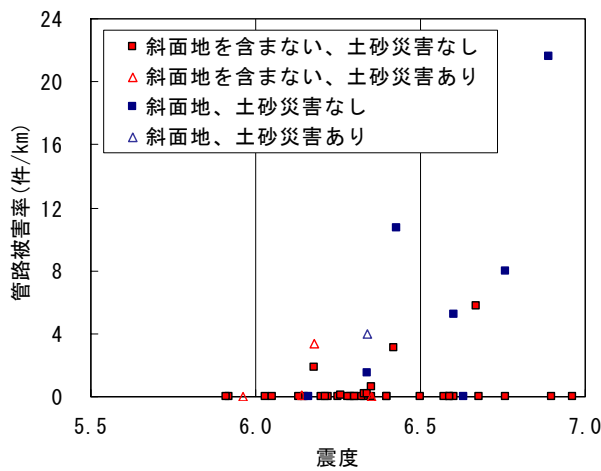


図8 集落別アンケート震度と管路被害率の関係

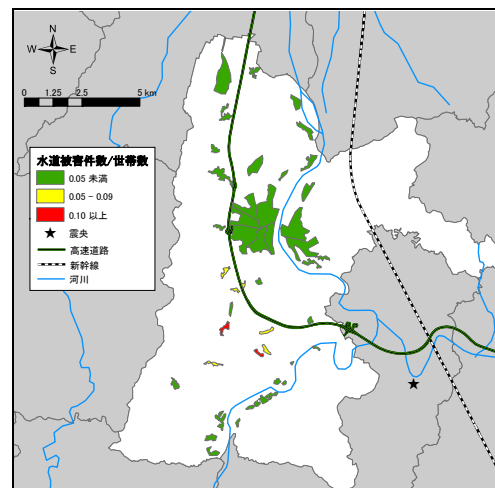


図9 集落別管路被害状況

4. 被害予測式における斜面地形の影響係数

上述の分析で示されたように斜面地形が地震時に管路被害に与える影響は大きい。兵庫県南部地震の管路被害から予測式を構築したものは多くあるが、斜面地形の影響を十分に反映したものは少なかった。そこで、本稿では既往の被害予測式を用いて推定を行い、実際の被害と比較検証することで、斜面地形

の影響程度を定量化することを試みる。

本稿で用いる被害予測式は、高田ら¹³⁾によって兵庫県南部地震時の神戸市、芦屋市、西宮市の管路被害をベースに多変量解析を用いて構築されたものである。各メッシュの被害率は、最大加速度や最大速度から標準被害率を算出し、それに管種と口径、液状化の条件による補正係数を乗じることによって求められる。以下の式は、管路の被害率算定式である。

$$S = S_d \cdot C_p \cdot C_d \cdot C_l \quad (2)$$

ただし、 S ：管路被害率（件/km）、 S_d ：標準管路被害率（件/km）、 C_p ：補正係数（管種、0～2.5）、 C_d ：補正係数（口径、0.5～1.6）、 C_l ：補正係数（液状化の有無、1.0～4.0）

さらに、本式で得られた管路被害率に対象エリアの管路敷設延長を乗じることによって被害件数が算出される。式(2)が構築されたデータベースには、断層近傍や山間部の切盛土がなされた地域など特殊条件によって被害の多くなる地域は除外されているため、この式はほぼ平地における管路被害予測式として見なすことができる。

長岡市において、第3章では最大加速度を推定して震度を算出したが、本章では最大速度を用いて管路被害を推定する方が精度良く推定できることが知られているため、過去5年に発生した地震の最大速度と震度との関係式⁹⁾を用いて、震度から最大速度を推定したものをを用いて管路被害推定を行った。また、本推定式では口径φ75mm未満の管路の被害予測式は示されていないが、参考のためにφ75mmの補正係数と同じ係数を用いて評価を行なった。地形条件には、1kmメッシュ内に斜面地形を含むメッシュを斜面地として、それ以外は平地とした。本分析での斜面地形を含むメッシュの割合は平均して19%である。

図10は震度別、地形別に平地として管路被害予測式を用いて予測した件数（以後、平地予測件数）と実被害件数を比較したものである。ただし、各地形・震度・口径別で分けた区分において、管路敷設延長が5km以下の場合にはデータから除去した。ここで、地形による影響を分析するため、地形係数は実被

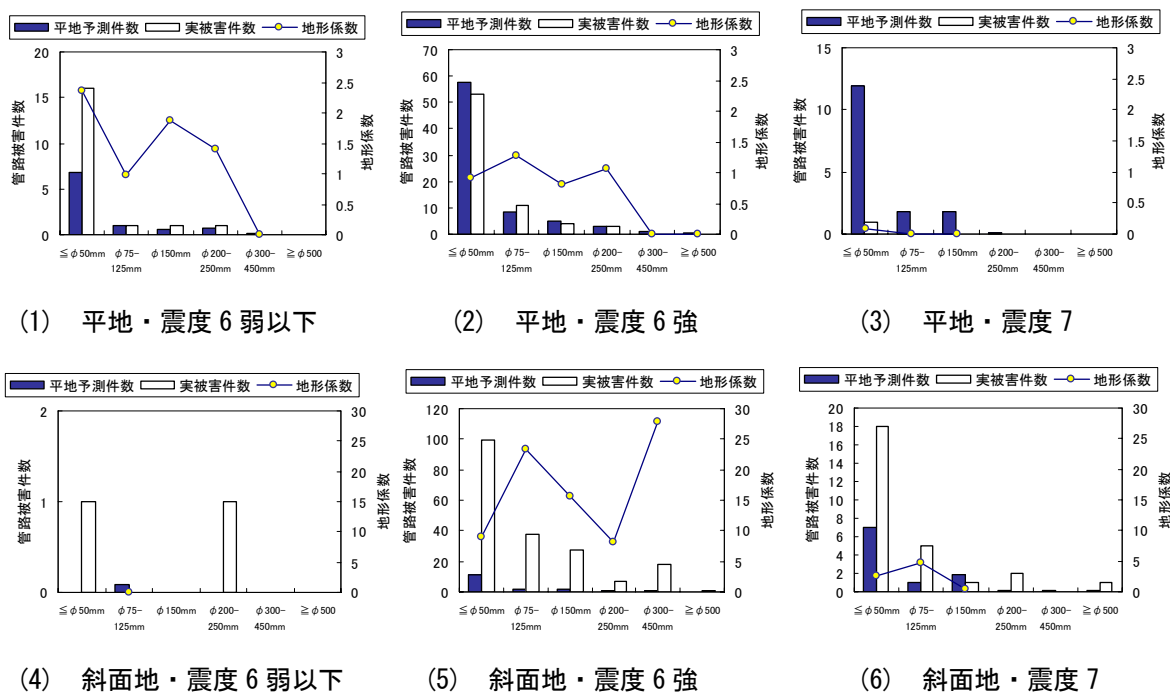


図10 地形・震度別予測式による予測値と実被害値との比較

害件数を平地予測数で除した値であると定義する。平地で震度 6 弱以下・6 強の地域では、図中の地形係数が 0.5~2.0 付近にある。つまり、平地地形では新たな地形係数を考慮しなくとも、既往の予測式で十分評価が可能であるといえる。平地で大口径や震度 7 の地域では敷設延長が短いために推定値が小さく、係数も小さくなっている。しかし、相対的にみれば 1、2 件程度の推定誤差範囲内であるため（震度 7 の $\phi 50\text{mm}$ 以下では、他の地域と比べ敷設延長が短く、敷設延長が人口からの推定値であるため、それらによる誤差とも考えられる）、予測結果に大きく影響してこない。一方、斜面地では、全体的に地形係数が大きく、震度・口径によって最大で 27.9 にもなる。震度 6 弱以下の地域の係数は、管路敷設延長が短かったために、本分析データからは十分な検討はできない。震度 6 強・7 の地域では、局所的に偏った口径に管路被害が生じていることから口径による係数のばらつきが大きくなっている。

表 3 は口径ごと地形・口径別の実被害件数と平地予測件数を比較している。これによると地形係数の平均値は、平地で 0.93、斜面地で 8.08 の地形係数が得られた。平地については、この地形係数値からも既往の予測式のみで適用可能であると考えられる。一方斜面地では、地形効果によって既往予測式で推定された被害件数よりも実被害は大きくなるため、斜面地形対応型の地形係数を考慮する必要がある。斜面の地形係数として 8.1（適用性から小数第一位に係数をまるめた）を斜面地のみに適用すると、表中の最下段に示すように、予測件数は実被害件数に近くなることがわかる。

表 3 長岡市の管路被害と予測値との比較

		口径						総計
		50mm 以下	75-125 mm	150mm	200-250m	300-450 mm	500mm 以上	
平地	平地予測件数 N_{pe}	76.2	11.4	7.3	3.6	1.3	0.3	100.1
	実被害件数 N_{pa}	70	12	5	4	0	0	91
	地形係数 N_{pe}/N_{pa}	0.92	1.05	0.69	1.10	0.00	0.00	0.91
斜面地	平地予測件数 N_{se}	18.5	2.8	3.6	1.1	0.8	0.2	27.1
	実被害件数 N_{sa}	118	43	28	10	18	2	219
	地形係数 N_{sa}/N_{se}	6.37	15.36	7.71	8.83	22.89	8.17	8.08
全体	平地予測件数 N_{ae}	94.7	14.2	10.9	4.8	2.1	0.6	127.2
	実被害件数 N_{aa}	188	55	33	14	18	2	310
	地形係数 N_{aa}/N_{ae}	1.98	3.87	3.03	2.94	8.69	3.60	2.44
修正予測値（全体）		226.2	34.1	36.7	12.8	7.7	2.3	319.7

小千谷市においても、長岡市で行った地形係数を用いて検討を行う。ただし、詳細な管路網データがないため、第 3 章と同様に口径 $\phi 75\text{mm}$ 以下の管路について世帯数から管路延長を簡易推定したものを用いた。さらに、アンケートから推定された震度から最大速度値に変換して、最大速度から推定される標準被害率に補正係数を乗じて件数を算出した。それぞれの集落が小さいため、小千谷には平地と斜面地の二つに区分した。表 4 は、 $\phi 75\text{mm}$ 以下の管路の主な管種が不明であるため、係数を考慮しな

表 4 小千谷市の平地予測件数と実被害数

	平地予測件数	実被害件数	地形係数
平地	41.0 (12.3)	15.0	0.4 (1.2)
斜面地	4.3 (1.3)	21.0	4.8 (16.1)
全体	45.3 (13.6)	36.0	0.8 (2.6)

注：平地予測件数、地形係数で括弧のない数字は管種の補正係数が考慮されていない数値。括弧内の数字は、全てダクタイル鋳鉄管（A・K 型継手）であると仮定した時の数値である。

かった場合と、ダクタイト管と仮定した場合の数値を考慮した。これによると、小千谷市でも平地での推定値は実際の被害件数の倍半分の範囲に収まっているが、斜面地では地形係数にして 4.8 倍（多い場合では 16.1 倍）も高くなることが分かる。地震動の推定方法や管路被害の評価方法が異なっているも、地形係数という指標で比較した場合ほぼ同じ係数が得られることが分かった。

そこで、斜面の地形係数について、既往予測式の液状化の補正係数と比較しながら検討する。本予測式の液状化の補正係数には、液状化が発生しない場合を 1.0 の値とし、埋立地など大規模な流動が発生するエリアでは PL 値に応じて最大 4.0 の値をとるように設定されている。斜面地の補正係数は、前出の長岡市での斜面の地形係数を参考にして 8.1 と設定すれば、液状化の補正係数に比べて 2.0 倍も大きいことになる。

ここで、管路が埋設されている地盤についてブロック状となって片側地盤が沈下することを想定する。管路には沈下側、非沈下側の地盤ではともに管軸直角方向に等分布荷重がかかる。しかし、液状化するような軟地盤では管路への地盤拘束力が小さくなるため、硬地盤の場合と比較すれば同じ地盤変位量に対して安全となる。Liu ら¹⁴⁾は断層を横断する鋼管路の挙動解析から断層変位に対する管路最大ひずみを算出する簡易推定式を提案している。当研究では、断層を模して片側地盤に強制変位を与えているが、管路と断層との交差角が 90° の場合、地盤変状によって沈下しているモデルと変わらない。そこで、本簡易推定式を用いて液状化地盤と斜面地地盤との管路への影響をみる。式(3)は、断層変位に対する管路最大ひずみの推定式を示している。

$$\varepsilon_{\max} = Y_1 \cdot \frac{2 \cdot I}{L_P \cdot A \cdot D} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \left(\frac{0.6}{D}\right)^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{V}{200}} \quad (3)$$

$$Y_1 = \begin{cases} 0.346 \cdot X_1 & 0 \leq X_1 < 83.7 \\ 28.9 & 83.7 \leq X_1 < 1400 \end{cases}$$

$$X_1 = \frac{\sqrt{(\Delta \cdot \cos(\beta) + L_P)^2 + (\Delta \cdot \sin(\beta))^2} - L_P}{L_P} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^2$$

$$L_P = 8 \sqrt{\frac{I \sigma_y}{\pi D P}}$$

ただし、 $2 \cdot I / (L_P \cdot A \cdot D)$ の項は管厚による補正係数、 I : 断面二次モーメント、 P : 受働土圧、 $\sqrt{\sigma_y / E}$ の項は管材料による補正係数、 σ_y : 曲げ応力、 E : ヤング係数、 $(0.6/D)^{1/4}$ の項は口径 600mm を基準とした場合の口径の補正係数、 D : 口径、 $\sqrt{200/V}$ は地盤せん断波速度 200m/s を基準とした場合の地盤硬さによる補正係数。 Δ : 断層変位、 β : 交差角、 t : 管厚

斜面地での地盤沈下は液状化地盤層によって沈下する場合もあるが、一般には表層は硬地盤である。図 11 は地盤のせん断波速度が変化した場合の管路最大ひずみへの影響程度を示している。図中縦軸は、地盤のせん断波速度が 200m/s に発生するときの最大ひずみ値に対する各せん断波速度の場合に簡易推定式から算出される最大ひずみの比を補正係数として扱っている。地盤が硬くなるにつれて、ひずみが大きくなり管路被害が発生しやすくなる。せん断波速度を液状化地盤で 50m/s、斜面地地盤で 200m/s とすれば、斜面地地盤でのひずみの発生量は液状化地盤のものとは比べて 2 倍となる。斜面地での地形係数が液状化地盤係数よりも 2 倍程度大きくなるのは、この地盤硬さが斜面地形の地形係数を増大させた要因の一つになっていると考えられる。

本研究では、地形条件を考慮して地震動と管路被害の関係について分析した。新潟県中越地震での斜面地での管路への影響として、8 倍程度大きくなることが示された。今後は、他の地震でも同様な分析を行い、斜面の補正係数をさらに検討していく必要がある。

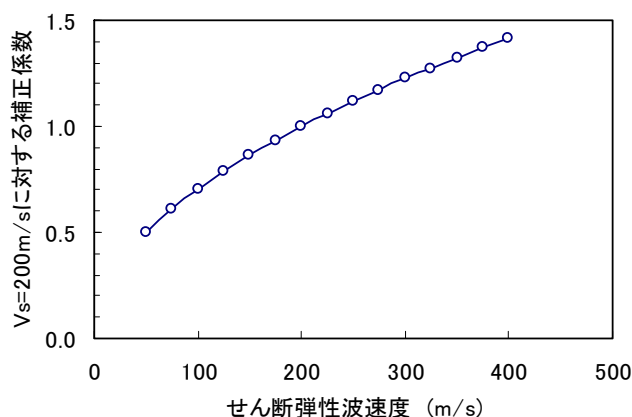


図 11 地盤のせん断弾性波速度による管路最大ひずみへの影響

5. 結論

本研究は、新潟県中越地震における長岡市と小千谷市の水道管路被害分析を行った。さらに、既往の被害予測式を用いて推定を行い、実被害と比較検証することで、斜面地形の影響程度を定量化することを試みた。本研究で得られた結果を下記にまとめて示す。

- 管路被害は斜面や崖地形に集中した。斜面地形上の地盤変状に伴って局所的な被害が発生したために、被害率では大きな値を示す結果となった。
- 斜面地形を含む地域では、震度が 6 強になるあたりから急激に被害率が高くなることが分かった。つまり、地震動がある程度大きくなった場合に、斜面地形条件では地盤変状が発生しやすくなり、局所的な地盤変状によって管路被害がもたらされたことが考えられる。
- 平地では、地震波動は管路被害の主な原因となるため、一箇所で管路被害が発生すれば、そこで応力が開放され、隣接する管路にひずみが伝播されないために、管路被害率がある値以上にはならないといえる。
- 斜面地形を含まない平地においては、既往の被害予測式で推定された被害件数と実際被害件数とはよく合っていることが確認できた。また、斜面地形を含む地域では、管路被害予測式で算出された予測値よりも平均して 8.1 倍程度大きくなることがわかった。
- 既往の液状化地盤係数よりも斜面地地盤係数が 2 倍ほど大きい要因として、地盤変状が発生する場所の地盤硬さが一つの要因であると考えられる。

謝辞

本論の作成に当たり、貴重な資料を提示して頂きました長岡市水道局、小千谷市ガス水道局、新潟市水道局の皆様へ厚く御礼申し上げます。また、アンケート調査においては、小千谷市の教育委員会ならびに各小学校の先生方に協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針、2001年
- 2) 日本ガス協会：水道施設耐震工法指針、1997年
- 3) 例えば、断層管路研究会：研究報告書、1999年
- 4) American Lifelines Alliances：Seismic Guidelines for Water Pipelines、2005年
- 5) 磯山龍二、石田栄介、湯根清二、白水暢：1995年兵庫県南部地震に基づく水道管路の地震被害推定式、第10回日本地震工学シンポジウム、1998年、pp.3175-3180
- 6) 高田至郎、李騰雁、西川啓二：観測記録に基づく地震動補間推定、平成10年度関西支部年次学術講演会、土木学会関西支部、ppI-2-1、1998年
- 7) (財)新潟県地盤調査業協会：新潟県地盤図、1992年
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、1996年、p.43
- 9) 新谷正樹、楢田泰子、高田至郎：加速度係数とテレビ挙動解析を用いた最大加速度推定法の提案、土木学会地震工学論文集、2005年（印刷中）
- 10) 高田至郎、上田直樹：計測震度に対応した新しいアンケート震度の算定手法、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、1998年、pp.631-636
- 11) 高田至郎、楢田泰子、勤息義弘、新谷正樹、新潟県中越地震における小千谷市の地震動と水道管被害分析、神戸大学都市安全研究センター研究報告（投稿中）
- 12) 国土交通省河川砂防部保全課：平成16年(2004年)新潟県中越地震における土砂災害(速報)(新潟県中越地震復旧・復興GISプロジェクトホームページより引用：<http://chuetsu-gis.nagaoka-id.ac.jp/index.html>)
- 13) 高田至郎、藤原正弘、宮島昌克、鈴木泰博、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、2001年、第798号、pp.21-37
- 14) Liu Aiwen and Shiro Takada：Study on the large deformation in a buried pipeline under fault movement、Proceedings of the Fourth China-Japan-USA Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering、2002年、pp.161-168.

(受理：2005年7月8日)

(掲載決定：2005年11月1日)

Slope Effects to Water Pipeline Damage; A Case Study during the 2004 Niigata Chuetsu Earthquake

KUWATA Yasuko ¹⁾, TAKADA Shiro ²⁾, GONSOKU Yoshihiro³⁾ and
Javanbarg Mohammad Bagher⁴⁾

1) Member, Research Associate, Kobe University, Dr. Eng

2) Member, Professor, Kobe University, Dr. Eng

3) Graduate student, Kobe University

4) Graduate student, Kobe University, MS

ABSTRACT

This paper analyzes water pipeline damage during the Niigata Chuetsu earthquake considering seismic intensity and geomorphology. In the analysis, GIS tools, estimation method of ground motion by interpolation, and questionnaire survey for ground motion were used. Pipe failures were mostly caused by ground deformation on the slope triggered by high seismic intensity. We analyzed the effects of slope quantitatively using the estimation formula of pipeline damage and introduced new coefficient of slope applicable to that formula.

Key Words: Ground deformation, pipeline damage, geomorphology, Niigata Chuetsu earthquake