東北地方太平洋沖地震における宮城県仙台市の 水道管路被害状況の分析

丸山 喜久¹・伊藤 智大²・若松 加寿江³・永田 茂⁴

¹正会員 千葉大学准教授 大学院工学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

²元 千葉大学 工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

³正会員 関東学院大学教授 理工学部土木学系 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

E-mail: wakamatu@kanto-gakuin.ac.jp

⁴正会員 鹿島技術研究所 都市防災・風環境グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

E-mail: nagata-shigeru@kajima.com

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、都市ガスや上下水道などの地中埋設管に多数の被害が生じた。とくに宮城県仙台市では約23万戸の断水が発生し、水道管被害の多くは丘陵地を造成した人工改変地に集中した。管路被害予測式では、地震動強さの関数である標準被害率曲線に各種の補正係数を乗じることにより、被害率を算出している。しかしながら、自治体の地震被害想定等では、改変地形の考慮が必ずしも充分ではないことがある。本研究では、東日本大震災により被害を受けた宮城県仙台市を対象地として水道管被害の分析を行い、丘陵の造成地の影響を考慮する方法を提案する。なお、補正係数の値に関しては、他地域の事例も併せて分析したうえで設定すべきものと考えられる。

Key Words: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, water distribution pipeline, developed hilly area, damage ratio

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の広範囲にわたって電力、上下水道、都市ガス、通信などのライフライン施設に被害が生じた。Nojima¹⁾は、これらのライフラインが途絶した需要家数および復旧日数を1995年兵庫県南部地震の際と比較しており、東北地方太平洋沖地震直後に電力や上水道が途絶した需要家数は兵庫県南部地震の場合よりも多いが、その復旧状況は津波による被災地域を除けば両者にあまり大きな差がないことを示している。ライフラインが途絶した需要家数に差があるのは、両地震のマグニチュードが大きく異なるため、強震動に曝された地域が東北地方太平洋沖地震の方が広範囲であったことが影響しているものと考えられる。

一方で、ライフラインが途絶した需要家数に差があるにもかかわらず、両地震で復旧日数にあまり差が見られなかった理由としては、兵庫県南部地震を契機とした地震対策が功を奏したことが挙げられ

る。例えば、都市ガスに関しては、兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震と比べて、本支管の被害率は低く、復旧に要した期間も兵庫県南部地震の際よりも明らかに短かった²⁾。これは、耐震性の高いポリエチレン管(PE管)の敷設割合を兵庫県南部地震以降高めてきたことや即時の供給停止を実現するブロック化を進めてきたことなどが一因とされている²⁾。

このことを踏まえると、大地震後にライフライン施設の被害状況を継続的に分析することは、過去の地震を受けて講じた対策の事後評価や次の地震による被害予測を行う際の基礎資料として有用と考えられる。東北地方太平洋沖地震では、宮城県内を中心にピーク時で約220万戸以上が断水した³⁾。鉄田・片桐⁴⁾によると、187市町村で断水が発生したものの兵庫県南部地震の際の神戸市での配水管被害率と比べて全体的に軽微であったことが報告されており、この地震の際の詳細な水道管の被害は分析する意義がある。

そこで、宮城県仙台市の上水道管路データと導水・

表-1 仙台市水道局における導水・送水・配水管の被害数と延長

管種	管体破損	継手抜け	その他	合計	延長(km)
DIP ^{*)}	27	84	6	117	2723.1
VP	244	45	8	297	1514.5
GP	4	1	1	6	4.9
SP	1	4	7	12	137.3
LP	1	1	0	2	3.4
PP	2	0	1	3	52.7
合計	279	135	23	437	4458.0 ^{**)}

*) 耐震管 (約845km) は被害なし

**) 仙台市内の総延長

送水・配水管の被害データ⁵⁾を用いて、地震動強さと管路被害率の関係を評価する。永田らは、仙台市の上水道管路の被害状況を定量的に分析し、宅地造成地での被害の特徴や管路耐震化の効果を明らかにしている⁶⁾。本研究では、永田らの結果⁶⁾を踏まえて、水道管路被害予測式⁷⁾⁻¹¹⁾と仙台市の管路被害率の比較を行い、丘陵の造成地で被害が集中することを考慮する方法を提案する。さらに、水道技術研究センターが東北地方太平洋沖地震後に見直した管路被害予測式¹¹⁾と比較し、管種、管径、地形に関する補正係数の妥当性を評価し、今後の水道管路の地震被害予測や管路更新計画の立案に貢献できることを目指す。

2. 宮城県仙台市の上水道管路の被害状況

2011年度時点での仙台市水道局の給水人口は1,028,015人、給水戸数は468,910戸である。これらの需要家に対して、5箇所のダムと宮城県仙南、仙塩広域水道からの浄水を受水し、4箇所の主要浄水場、65箇所の配水施設を通じて上水を供給している¹²⁾。東北地方太平洋沖地震では、約23万戸の断水、断水人口約50万人(断水率約50%)の被害が発生し、津波による被害が甚大な地域を除けば3月29日に全面復旧に至った⁵⁾。水道管路および付属設備の被害数は1,064件であり、導水・送水・配水管については437件の被害があった。管路延長は約4,458kmで、全体の被害率は約0.1件/kmである⁵⁾。なお、2012年に日本水道協会がまとめた報告書¹³⁾では、管径75mm以上の被害状況がまとめられており、導水・送水・配水管の被害数は276件、被害率は0.07件/kmとされている。

本研究では、仙台市水道局から提供を受けた437

件の導水・送水・配水管被害およびマッピングシステムによる管路敷設状況に関するGISデータを用いて分析を行う。管種、管径ごとの被害の詳細については、文献⁵⁾の通りであるが、表-1に主な管種ごとの被害形態別の被害数を示す。ここで、DIPはダクタイル鋳鉄管、VPは塩化ビニル管、GPは亜鉛メッキ鋼管、SPは鋼管、LPは鉛管、PPはポリエチレン管を表す。437件の被害のうち、約70%の297件がVP、約25%の117件がDIPで発生している。なお、DIPのうち耐震継手¹⁴⁾を有する管路(延長約845km⁵⁾)では被害がなかった。

図-1に仙台市における導水・送水・配水管の被害位置と管路の敷設状況を示す。また、図中では、若松・松岡による微地形区分(世界測地系)¹⁵⁾も示している。赤色(太線)で示した管路がDIPのうち耐震継手を有するものであり、被害率(件/km)を算出する際の管路延長からは除外して考えることとする。図-2に、微地形区分および後述する地形補正係数(C_g)ごとの導水・送水・配水管の被害数、管路延長と被害率を示す。ここで、被害率は管路延長が充分長いDIP(一般継手)とVPについて管種別に示し、さらに耐震管を除外した全管種の被害率を参考として示す。

水道技術研究センターは、管路更新計画の優先順位付けや地震被害予測に貢献することを目的として、兵庫県南部地震、新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震における管路被害データを用いて水道管の被害予測式を2011年3月に提案した¹⁶⁾。さらに、東北地方太平洋沖地震により生じた管路被害を新たな知見として取り入れて、2013年3月に被害予測式を修正した¹¹⁾。提案された被害予測式は式(1)のようである。

$$R_m(v) = C_p C_d C_g R(v) \quad (1)$$

ここで、 $R_m(v)$ は水道管路の被害率(件/km)、 C_p は管種・継手別の補正係数、 C_d は管径別の補正係数、 C_g は地形別の補正係数で微地形区分に対応付くように設定されている^{11),16)}。また、 $R(v)$ は標準被害率であり最大速度(PGV) v (cm/s)の関数として以下のように与えられる。ただし、 v が15cm/s以下のときは $R(v)$ が0、適用可能な最大速度の上限は120cm/sとされている。

$$R(v) = 9.92 \times 10^{-3} \times (v - 15)^{1.14} \quad (2)$$

東北地方太平洋沖地震の際の宮城県仙台市では、丘陵に敷設された水道管で被害が多数発生していることが分かる。とくにVPは、約300件の被害が発

図-1 仙台市中心部における微地形区分¹⁵⁾および導水・送水・配水管の被害位置と管路の敷設状況

図-2 微地形区分ごとの導水・送水・配水管の被害数と被害率

生した。丘陵の補正係数 (C_g) は 0.4 と定められており、相対的には被害が生じにくい地形と考えられているが、仙台市に関しては VP が約 0.3 件/km, DIP (一般継手) が約 0.1 件/km の被害率を示した(図-2)。式 (1) の地形補正係数 C_g と仙台市における被害率を比較するために、管径補正係数 C_d が 1.0 であ

図-3 地形補正係数ごとの被害率 ($C_g = 1.0$ の被害率で基準化, 管径 100-150 mm のみ)

る 100-150 mm の導水・送水・配水管の被害数と延長を集計し、地形補正係数の値ごとに被害率を算出すると図-3 のようになる。なお、図中では、 C_g が 1.0 と定められている低地 (谷底低地、扇状地、後背湿地など) の被害率で基準化している。仙台市では、丘陵で被害が多数生じていることが影響し、 C_g が 0.4 と定められている山麓地、丘陵地などで C_g が 1.0 の低地よりも VP が約 2 倍以上、DIP が約 3 倍以上高い被害率を示しており、地形補正係数 0.4 との乖離が大きい。また、 C_g が 2.5 と定められている自然堤防、旧河道、砂州・砂礫州などの VP の被害率は小さく、DIP は C_g が 1.0 の低地とほぼ同じ被害率を示している。これらの地形は沿岸部に多くあることから、津波による被害が甚大な地域の水道管被害が十分に精査されていないことが影響している可能性もあるため、詳細な議論は難しい。 C_g が 0.8 と定められている台地 (砂礫質台地、ローム台地) に関して

図-4 管径別の導水・送水・配水管の被害数と被害率

図-5 管径補正係数ごとの被害率(管径100-150mmの被害率で基準化, $C_g = 1.0$ の地形の被害のみ)

は, VP は概ね補正係数の値と調和的, DIP は低地の被害率の約 1.5 倍高い被害率を示した。

仙台市全域に関して, 管径別の導水・送水・配水管の被害に関する分析を行う。図-4 には, 管径別の被害数, 管路延長と被害率を示す。VP の被害が管径 200 mm 以上で 0 件なのは, 管径 200 mm 以上の VP が敷設されていないためである。なお, 図中には式(1)で定められている管径に関する補正係数¹¹⁾も示している。図-5 は, 式(1)の管径補正係数 C_d と比較するため, 地形補正係数 C_g が 1.0 の低地における被害数と延長をもとに被害率を算出し, C_d が 1.0 である管径 100-150 mm の被害率で基準化した結果を示す。管径 100-150 mm の補正係数が 1.0, 管径 50-80 mm の補正係数が 2.0 と定められているが, VP の被

害率は管径 50-80 mm のときに管径 100-150 mm に対して約 1.5 倍高い。管径が大きいほど補正係数は小さく設定されているが, DIP の被害率は管径 100-150 mm のものと比べて概して高い。図-4 に示したように仙台市の場合は, 管径の大きな DIP の管路延長は 100-150 mm の延長と比較してかなり短いため, この結果のみで管径が大きい場合の補正係数を議論することはやや難しいと思われる。一方で, 仙台市では, 管径 500 mm 以上の大口径の DIP に 3 件の被害が生じているため, これらの被害に関してはとくに詳細な検討を要するものと考えられる。

片山ら¹⁷⁾は, 1978 年宮城県沖地震における宮城県の上水道施設の分析を行っている。仙台市および泉市(現在は仙台市泉区)に関する分析結果によると, 丘陵部の宅地造成地に被害が集中したことが分かっている。本章の結果や東北地方太平洋沖地震の際の都市ガス施設の被害状況²⁾を鑑みると, 地形別の補正係数が小さく設定される丘陵で多くの被害が生じたことが仙台市の埋設管被害の特徴の一つと考えられる。

3. 丘陵の造成地の抽出方法に関する検討

(株)復建技術コンサルタントは, 仙台市の造成宅地地盤図¹⁸⁾(以下, 造成宅地地盤図とする)を公開しており, 東北地方太平洋沖地震後には造成宅地の被害分析^{19), 20)}や, 木造建物, 上水道被害と切盛厚さの関係の評価²¹⁾などに広く用いられた。このような造成地の位置と規模を把握する手法として, 人工改変地形データ抽出のための手順書²²⁾が国土理院によってまとめられている。盛土造成地の位置と規模を把握するには, レーザー計測による標高データ, 米軍の空中写真, 旧版地形図などが必要である。仙台市の造成宅地地盤図では, 造成前の地形データを昭和 30, 40 年代の地形図の等高線から取得している²³⁾。

詳細な造成地盤図を作成するには多大な労力を要するが, 本研究では全国を均質に網羅したデータセットを用いてマクロに丘陵上の造成地を抽出する方法について検討を行う。このようなマクロな手法を検討する目的は, 首都圏での M7 クラスの地震の切迫性が指摘²⁴⁾されていたり, 南海トラフを震源とする巨大地震の発生が懸念²⁵⁾されていたりすることを踏まえて, 将来的には広域のライフライン被害予測への適用を図るためである。本研究では, 微地形区分¹⁵⁾と国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ²⁶⁾を使用する。微地形区分では, 開発前の原地形

図-6 土地利用細分メッシュデータ（平成 21 年度版）と水道管の被害位置および管路敷設状況（図-1 と同範囲）

図-7 本研究で推定した丘陵上の造成地と造成宅地地盤図¹⁸⁾の比較

が 250m メッシュ単位で把握できる¹⁵⁾。土地利用細分メッシュデータ（平成 21 年度版）は、人工衛星画像、1/25000 地形図を用いて整備されたデータで、100m メッシュ単位で土地利用の状況が分かる（図-6）。

本研究では、丘陵の造成地を把握するため、微地形区分で丘陵かつ土地利用細分メッシュデータで建物用途と分類されている地域を抽出することとし

た。微地形区分での丘陵は、標高が比較的小さく、1km メッシュにおける起伏量が概ね 200m 以下の斜面からなる土地と定義されている²⁷⁾。土地利用細分メッシュの建物用途は、住宅地・市街地等で建物が密集しているところと定義される²⁶⁾。図-7 に、本研究で推定した丘陵上の造成地と造成宅地地盤図によって造成地と特定されていた地域を比較する。本研究の造成地と宅地造成地盤図の造成地は、2 地域

表-2 本研究で用いた地震観測記録

観測点	東経 (°)	北緯 (°)	PGV (cm/s)	観測網
柳生中学校	140.872	38.189	76.2	Small-Titan
東四郎丸小学校	140.923	38.194	86.0	
荒浜小学校	140.980	38.223	80.3	
東長町小学校	140.890	38.220	81.0	
太白小学校	140.818	38.231	35.1	
栗生小学校	140.786	38.267	54.3	
東北工大香澄町	140.851	38.246	70.4	
東北工大二ツ沢	140.870	38.234	54.0	
七郷中学校	140.946	38.237	145.4	
仙台工業高校	140.918	38.259	68.5	
連坊小路小学校	140.887	38.252	61.6	
桜丘小学校	140.851	38.303	58.7	
宮城県立盲学校	140.879	38.278	53.9	
南光台東小学校	140.913	38.299	77.0	
岩切中学校	140.945	38.302	106.4	
七北田中学校	140.892	38.324	84.9	
古城小学校	140.897	38.236	64.2	DCRC
東六郷小学校	140.949	38.199	77.8	
第一中学校	140.846	38.273	55.5	
将監中央小学校	140.874	38.337	64.6	
松森小学校	140.919	38.320	118.9	
宮城県立図書館	140.839	38.346	64.4	
沖野小学校	140.914	38.226	78.9	
南小泉小学校	140.906	38.245	63.3	
西多賀中学校	140.852	38.226	53.6	
富沢中学校	140.863	38.218	58.1	
東配水管理事務所	140.927	38.253	77.1	K-NET
長町南コミュニティセンター	140.881	38.224	72.7	
K-NET仙台	140.929	38.266	84.8	K-NET

図-8 旧版地形図を用いた造成地の抽出結果の検証(仙台市青葉区旭ヶ丘)

で大きく異なる。まず、青葉区高野原、赤坂は、微地形区分ではローム台地として分類されるため、丘陵の造成地を把握することを目的とする本研究の手法では抽出されていない。

青葉区旭ヶ丘では、造成宅地地盤図の造成地よりもやや広い範囲が抽出される結果となった。この地域に関して、図-8のように旧版地形図を用いて抽出結果の検証を行った。1964年(昭和39年)測量の地形図によると、地下鉄台原駅周辺と旭ヶ丘駅の東側と南側は、すでに宅地用に整地されていることが分かる。一方、1928年(昭和3年)測量の地形図では、これらの地域に等高線が密に存在することから、原地形は起伏が大きい地形であったものと考えられる。前述のように、造成宅地地盤図は昭和30、40年代の地形図を用いて旧地形の標高が取得されたため、すでに造成が済んでいた青葉区旭ヶ丘周辺では、造成地の範囲が実際よりもやや狭くなったものと考えられる。本研究の方法は、詳細な造成宅地地盤図のように盛土や切土厚さを把握することはできないが、古い造成地も含めて場所や広さを把握することができる。このことから、盛土造成地の詳細な評価を行う前のスクリーニングや、広域を対象とした地震被害想定などで宅地造成地の影響を考慮する場合

被害率は 0.23 件/km となり、仙台市全域の被害率(約 0.1 件/km)⁵⁾と比べて 2 倍以上高かった。

4. 地震動強さと水道管路被害率の関係

宮城県仙台市における水道管被害率と地震動強さの関係を評価するために、仙台市内の強震記録として東北大学災害制御研究センター(DCRC)による観測記録²⁸⁾、東北工業大学の Small-Titan²⁹⁾および防災科学技術研究所の K-NET³⁰⁾ 仙台(MYG013)の観測記録を用いた。地震動指標には式(1)を鑑みて最大速度(PGV)を選び、水平 2 成分の合成値として算出した(表-2)。仙台市内の平均 PGV は 73.4 cm/s であり、100 cm/s 以上の PGV を 3 観測点で示した。丸山・山崎¹⁰⁾は、磯山ら⁷⁾がとりまとめた兵庫県南部地震の際の水道管被害率に、日本水道協会などが公開する新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震の際の市町村単位の被害率を加えて地震動強さと被害率の関係を評価している。この結果に、東北地方太平洋沖地震の際の仙台市全域における被害率(DIP: 0.04 件/km, VP: 0.20 件/km)⁵⁾を加筆すると図-9 のようになる。ここで、仙台市の地震動強さは PGV の平均である 73.4 cm/s とし、丸山・山崎¹⁰⁾による DIP および铸铁管(CIP)と VP の標準被害率曲線 $R(v)$ を併せて示す。鉄田・片桐⁴⁾などに

図-9 東北地方太平洋沖地震の仙台市全域における水道管被害率と既往地震の際の被害率の比較

に有効な手法と考えられる。

本研究で抽出した丘陵の造成地上の導水・送水・配水管の被害数は 269 件であり、仙台市全域での被害(437 件)の約 6 割を占めている。また造成地上の

図-10 Vs_{30} ¹⁵⁾を利用して推定した地盤増幅率の分布と本研究で設定した地震観測値の有効範囲

表-3 PGV と水道管路延長および被害数 (管径 100-150 mm)

PGV (cm/s)	Mean of PGV (cm/s)	造成地		$C_g=0.8$		$C_g=1.0$		$C_g=2.5$	
		DIP	VP	DIP	VP	DIP	VP	DIP	VP
-60	55.6	10 125.0	11 63.7	5 97.1	4 46.6	3 26.5	3 21.4	0 0.0	0 0.1
60-70	64.0	4 57.8	1 5.5	1 27.3	0 7.1	0 30.4	4 26.4	0 4.0	0 1.6
70-80	76.2	20 67.3	17 35.4	1 5.3	4 1.3	0 29.0	2 25.7	0 6.9	0 8.3
80-90	83.2	0 0.0	0 0.0	0 16.0	0 2.7	0 12.2	3 9.1	2 23.9	0 17.8
90-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100-	135.0	2 23.3	3 1.7	0 0.0	0 0.0	3 35.3	4 31.3	1 13.7	2 7.0

上段：被害数，下段：管路延長(km)

表-4 PGV と水道管の被害率 (管径 100-150 mm)

PGV (cm/s)	Mean of PGV (cm/s)	造成地		$C_g=0.8$		$C_g=1.0$		$C_g=2.5$	
		DIP	VP	DIP	VP	DIP	VP	DIP	VP
-60	55.6	0.08	0.17	0.05	0.09	0.11	0.14		
60-70	64.0	0.07	0.18	0.04	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00
70-80	76.2	0.30	0.48	0.19	3.01	0.00	0.08	0.00	0.00
80-90	83.2			0.00	0.00	0.00	0.33	0.08	0.00
90-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100-	135.0	0.09	1.76			0.09	0.13	0.07	0.28

図-11 仙台市における地震動強さと水道管被害率の関係 (管径 100-150 mm)

よって指摘されているように、過去の地震の際の被害率と比べると東北地方太平洋沖地震の仙台市での被害率は地震動強さの割には小さい。

兵庫県南部地震の際の水道管被害率は、地震動強さと対応付けるために、地震観測点周辺の 2km 四方

の範囲について算出されている⁷⁾。これは、2km 四方内の地震動強さのばらつきは小さいものと仮定し、地震計で観測された値をその範囲の揺れの代表値として使用しているものと解釈できる。一方、地盤条件の違いによって狭い範囲でも地震動強さが異なることがある^{31),32)}ため、地盤増幅度を考慮した空間補間によって地震動強さの分布を推定し、被害率を算出することもある^{33),34)}。本研究では、深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 (V_{s30}) の分布にもとづき、地震観測点 (29 地点) とほぼ同程度の地震動強さと考えられる範囲を選定した。 V_{s30} は、微地形区分、標高、傾斜、先第三系・第三系の山地・丘陵からの距離にもとづき推定され³⁵⁾、地盤増幅率と相関がある³⁶⁾。図-10 は、 V_{s30} の分布¹⁵⁾をもとに藤本・翠川の方法³⁶⁾で推定した地盤増幅率と本研究で定めた地震計の影響範囲の関係を示している。本研究のように比較的狭い範囲を検討対象とする場合は、地盤増幅率には微地形区分の影響が強く反映されることとなる。なお、図中で影響範囲を太線で示している古城小学校と沖野小学校は、自然堤防と扇状地の境界部に位置している。このため、微地形区分の境界で地盤増幅率の推定値が急変している。しかし、両微地形区分の対応する元々の地盤条件は微地形境界で急変するものではなく、境界付近では両微地形区分の地盤特性 (自然堤防では砂地盤、扇状地は砂礫地盤) の中間的な特性を有していると推定される。このことから、これらの 2 地点に関しては、あえて 2 つの微地形区分にまたがって地震計の影響範囲を設定した。

地震観測点周りの範囲ごとに管路延長と被害数をまとめ、さらに PGV の大きさによってその結果を集約した (表-3)。本章では、式 (1) の地形補正係数 C_g と地震動強さを考慮して比較するため、管径補正係数 C_d が 1.0 と定められている管径 100-150 mm の延長と被害率を対象とした。PGV は概ね 10 cm/s 刻みとし、被害数および管路延長は式 (1) の地形補正係数 C_g ごとに集計した。 C_g が 0.4 と定義される地形区分に関しては、前章で抽出した丘陵の造成地での被害数と管路延長のみを示している。また、本研究で使用了地震記録のうち PGV が 90-100 cm/s を示すものはなかったので、データなしとして扱う。造成地のうち PGV が 80-90 cm/s の場合と C_g が 0.8 とされる台地のうち PGV が 100 cm/s 以上の場合、および C_g が 2.5 とされる主として沿岸部の軟弱地盤のうち PGV が 60 cm/s 未満の場合の管路延長が 0.1km 以下と非常に短いため、これらの被害率は算出しなかった (表-4)。なお、平均 PGV は、管路延長による重み付き平均値とした。

図-12 仙台市内の水道管被害率と地震動強さの関係と造成地の補正係数の設定例（管径 100-150 mm）

図-11 に、宮城県仙台市における地震動強さと水道管被害率の関係を管種別に示す（管径 100-150 mm のみ）。 C_g が 1.0 とされる低地における DIP の被害率は概して小さい。PGV が 60-70 cm/s, 70-80 cm/s のとき低地では被害がないが、台地（ $C_g = 0.8$ ）と造成地では被害が発生している。とくに造成地の被害率は高く、補正係数を 0.4 とすることは適当ではないと考えられる。VP に関しても、低地よりも造成地の方が高い被害率を示すことが分かる。このような丘陵の造成地の被害率が低地の被害率よりも高くなる現象は、これまでの事例でもよく知られていることであるが、現状の被害予測式での扱いとは逆の傾向を示すものであり、地震被害予測や水道管路の更新計画立案の際に十分な配慮が必要なものと考えられる。

式 (1) を用いて仙台市内の水道管被害率と地震動強さの関係を評価すると図-12 のようになる。ここで、標準被害率 $R(v)$ には丸山・山崎¹⁰⁾ が構築した DIP の式と CIP および VP の式を用いた (式 (3), 式 (4))。

$$R(v) = 4.99\Phi((\ln v - 6.04)/0.864) \quad (3)$$

$$R(v) = 2.06\Phi((\ln v - 5.00)/0.860) \quad (4)$$

$\Phi(x)$ は標準正規分布の確率分布関数である。式 (3), (4) は、他の標準被害率^{7)-9), 11)} よりも小さい被害率を示す特徴がある¹⁰⁾。東北地方太平洋沖地震の際の

仙台市の被害率は既往のものとは比べて小さいため、本研究では標準被害率 $R(v)$ には小さい被害率を予測する式 (3), (4) を用いた。低地（ $C_g = 1.0$ ）での被害率は、PGV が 60 cm/s 未満のときの DIP の被害率を除き、全体的に式 (3), (4) よりも小さい。台地での被害率と式 (3), (4) に地形補正係数 0.8¹¹⁾ を乗じたものを比較すると、DIP の PGV が 70 cm/s 以下の被害率については予測結果が実際の被害率とある程度一致している。VP は被害率のばらつきが大きく、式の当てはまりを評価するのが難しい。丘陵の造成地での被害率は、式 (3), (4) に丘陵の地形補正係数 0.4¹¹⁾ を乗じてしまうと、DIP では PGV が 60 cm/s 未満, 70-80 cm/s のとき、VP では 70-80 cm/s, 100 cm/s 以上のときに被害率が高くなる現象を説明できず、全体的に過小評価となる。3 章で述べたように、本研究で推定した造成地の被害率は、仙台市全域の被害率の約 2.3 倍を示していたため、暫定的に 2.3 を造成地の地形補正係数 C_g とみなして式 (3), (4) に乗じたところ、DIP については PGV が 60 cm/s 未満, 80-90 cm/s のときの被害率と調和的な傾向を示すようになった。VP に関しては、本研究で暫定的に用いた補正係数の値はやや大きいように思われるが、造成地で被害率が大きくなる現象は反映されるようになる。

図-11, 図-12 によると、100 cm/s 以上の PGV を記録した 3 つの地震観測点周りの水道管路被害率は、造成地での VP の被害率を除き、地震動強さから推定される平均的な傾向よりも低かった。永田らも同様な結果を示しており、これらの地域の管路の耐震化率が高かったことを理由として挙げている⁶⁾。都市ガスの低圧本支管の被害分析²⁾でも、この地域の本支管の耐震化率が高く被害率が低い。本研究で被害率を算出する際には耐震管を含まない管路延長で被害数を除しているが、とくに DIP の被害率は低く、造成地で被害率が高くなる状況もあり顕著ではない。分析対象地域内における地震動が非常に強い領域の面積が小さいため、管路延長が短くなり、被害率にばらつきが生じやすいのは事実である（例えば、図-9）が、ある地域で管路の耐震化を進めると非耐震管を含めたネットワーク全体の堅牢性が高まる可能性もあり、今後の検討課題の一つと考えられる。

このように、東北地方太平洋沖地震の宮城県仙台市では、過去の被害データをもとに構築された被害予測式と比べてとくに丘陵の造成地で高い被害率を示した。仙台市の造成地では、谷埋め盛土、腹付け盛土の地滑り、斜面の崩壊などの地盤変動が多数報告されている^{20), 37)}。1978 年宮城県沖地震の際にも仙台市北部と南西部の宅地造成地盤で地盤変動に伴

う家屋被害が多数発生し³⁸⁾、これらの宅地造成地盤で水道管被害も集中した¹⁷⁾が、これと同様の被害が再び起こったものと考えられる。また、仙台市に限らず東北地方太平洋沖地震の際には造成宅地で滑動崩落等が多数発生したため、国土交通省が造成宅地滑動崩落緊急対策事業³⁹⁾を設けるなど危険性が改めて認識された。丘陵は良質な地盤であるため、現状の水道管被害予測式では地形補正係数が0.4と設定されているものと思われる。しかしながら、丘陵の造成宅地では盛土の地滑りなどの地盤変動に伴って水道管被害が集中することが懸念されることから、予測手法の改良が必要である。

5. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震の際の宮城県仙台市における上水道管路データと導水・送水・配水管の被害データを用いて、地震時の水道管被害予測手法の検証を行った。仙台市では、437件の導水・送水・配水管被害が発生し、そのうち約70%の297件がVP、約25%の117件がDIPであった。

仙台市全域の被害率を微地形区分ごとに評価を行った。管路被害予測式の地形補正係数 C_g は、微地形区分に対応付けて設定されている。補正係数が1.0と定義される低地(谷底低地、扇状地、後背湿地、三角州・海岸低地)の被害率を基準とすると、台地(砂礫質台地、ローム台地)のVPの被害率は約0.7倍となり補正係数の設定値(0.8)とほぼ一致した。DIPは、台地で低地よりも約1.5倍高い被害率を示した。補正係数が2.5と定義される自然堤防、旧河道、砂州・砂礫洲などの被害率は小さかったが、津波による被害が甚大な地域の被害状況が十分に精査されていないことが影響している可能性もあるため、詳細な議論は難しい。

地形補正係数 C_g が0.4である山地、山麓地、丘陵などに関しては、 C_g が1.0の低地の被害率と比べてDIPが3倍以上、VPが2倍以上高い被害率を示し、地形補正係数の設定値との乖離が最も大きかった。この結果をふまえて、本研究では、国土数値情報の土地利用細分メッシュと微地形区分を組み合わせる丘陵の造成地を推定し、さらに地震動強さの影響も考慮した検討を行い、水道管被害予測式に丘陵の造成地の地形補正係数を新たに導入する必要性を指摘した。

磯山ら⁷⁾が兵庫県南部地震の被害データをもとに提案した水道管被害予測式では、山地の地形補正係数0.4に対して改変山地が1.1、谷・旧水部が3.2と

提案されており、人工改変地が考慮されている。しかし、被害予測式を利用する地震被害想定や管路更新計画の策定には、日本全国を均質に網羅している微地形区分を地盤条件の評価に用いることが多い。そのため、造成地の被害が多いのは認識されていたものの地形補正係数が微地形区分ごとに設定されるようになってしまい、改変地の影響が考慮されなくなったものと考えられる。本研究では、丘陵の造成地を抽出する手法として土地利用細分メッシュと微地形区分を用いる方法を提案した。どちらも全国について整備された公開データであるので、丘陵の造成地を抽出するのに汎用性が高く、改変地の場所を特定することができるようになる。このため、丘陵の造成地に関して新たな補正係数を導入すれば、強震時に発生する地盤変動に伴い水道管被害が集中することを説明できるように手法が改良できるものと考えられる。本研究では、仙台市の被害率の分析結果から補正係数2.3を暫定的に用いたが、他地域の事例も併せて分析したうえで設定すべきものと思われる。なお、その場合には、低地での液状化が管路被害に与える影響^{40)~42)}を適切に分離したうえで検討を行う必要がある。

謝辞：本研究では、仙台市水道局から借用した2011年の配水管路データおよび東北地方太平洋沖地震における被害データを使用しました。また、独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netの強震観測記録、東北工業大学・リアルタイム強震観測センターのSmall-Titan 強震観測記録を使用しました。関係者各位に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nojima, N. : Restorations and system interactions of lifelines in the Great East Japan Earthquake disaster, 2011, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp. 1526-1531, 2012.
- 2) 総合資源エネルギー調査会都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会 災害対策ワーキンググループ：東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書, 2012.
- 3) 厚生労働省健康局水道課, 日本水道協会：平成23年(2011年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書, 2011.
- 4) 鉄田泰子, 片桐信：第10章 水道施設の被害, 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, 2011.
- 5) 仙台市水道局：東日本大震災 仙台市水道復旧の記

- 録, 2012.
- 6) 永田茂, 西野雅夫, 鈴木清一: 東日本大震災における上水道管路施設の被害分析, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp. 415-416, 2012.
- 7) 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 761 号, pp. 25-40, 1998.
- 8) 国土庁防災局震災対策課: 平成 8 年度南関東地域直下の地震被害想定手法検討調査, 1997.
- 9) 高田至郎, 藤原正弘, 宮島昌克, 鈴木康博, 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, Vol. 70, No. 3, pp. 21-37, 2001.
- 10) 丸山喜久, 山崎文雄: 近年の地震被害データを加味したマクロな配水管被害予測式の改良, 土木学会地震工学論文集, Vol. 30, pp. 565-574, 2009.
- 11) 水道技術研究センター: 地震による管路被害予測の確立に向けた研究報告書【概要版】, 2013.
- 12) 仙台市水道局: 平成 23 年度版環境報告書, 2011.
- 13) 日本水道協会: 平成 23 年 (2011 年) 東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書, 2012.
- 14) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 2010.
- 15) 若松加寿江, 松岡昌志: 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 日本地震工学会誌, No. 18, pp. 35-38, 2013.
- 16) 水道技術研究センター: 地震による水道管路被害予測の手引き, 2011.
- 17) 片山恒雄, 増井由春, 磯山龍二, 甚内郁郎: 1978 年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧, 生産研究, Vol. 31, No. 4, pp. 213-219, 1979.
- 18) 復建技術コンサルタント: 造成宅地地盤図に関する研究のページ, <http://www.fgc.jp/solution/technical/kouzou01/index.html> (2014 年 1 月 26 日閲覧).
- 19) 風間基樹: 2011 年東北地方太平洋沖地震による地盤災害と復興への地盤工学的課題, 東日本大震災に関する技術講演会論文集, 全国地質調査業調査協会連合会, 東北地質調査業協会, pp. 41-66, 2012.
- 20) 若松加寿江, 吉田望, 清田隆: 第 6 章 造成地の被害, 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, 2011.
- 21) 佐藤真吾, 栗谷将晴, 南陽介: 東北地方太平洋沖地震における谷埋め盛土造成宅地の被害と復旧課題, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp. 1477-1478, 2012.
- 22) 国土交通省国土地理院: 人工改変地形データ抽出のための手順書, 2010.
- 23) 栗谷将晴, 佐藤真吾, 小倉薫, 向山雅史: 地震防災のための仙台地区の造成宅地地盤図作成, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp. 1893-1894, 2004.
- 24) 首都直下地震モデル検討会: 首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 2013.
- 25) 南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について (第一次報告), 2012.
- 26) 国土交通省国土政策局国土情報課: 国土数値情報 ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2014 年 1 月 26 日閲覧).
- 27) 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.
- 28) 大野晋, 三屋栄太, 源栄正人: 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市域の地盤震動特性, 日本地震工学会論文集, Vol. 12, No. 4, pp. 339-353, 2012.
- 29) 神山真, 松川忠司, 穴澤正宏: 2011 年東北地方太平洋沖地震における東北工業大学アレー強震観測システム Small-Titan による強震記録について (速報), 2011.
- 30) 防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2014 年 1 月 26 日閲覧).
- 31) 時松孝次, 新井洋, 関口徹: 2004 年新潟県中越地震時に表層地盤の非線形震動増幅特性が小千谷の木造住宅被害に与えた影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 620, pp. 35-42, 2007.
- 32) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake, based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101, No. 2, pp. 688-700, 2011.
- 33) 酒井久和, 長谷川浩一, Nelson Pulido: 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.
- 34) 庄司学, 櫻井俊彰: 2008 年岩手・宮城内陸地震における斜面に関わる道路構造物の損傷モード分析とそれを踏まえた被害関数の構築, 日本地震工学会論文集, Vol. 11, No. 5, pp. 94-106, 2011.
- 35) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp. 239-251, 2005.
- 36) 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, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
- 37) 釜井俊孝: 2011 年東北地方太平洋沖地震によって発生

- した造成地盤の地すべり (第2報), http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/tohoku2011/land_20110701.pdf (2014年1月26日閲覧).
- 38) 沖村孝, 鍋島康之, 岡田肇, 野並賢: 東北地方太平洋沖地震による仙台市内及び周辺の宅地被害調査報告, https://www.jiban.or.jp/file/file/saigai_okimura_nabeshima_okada_nonami_0430_mini.pdf (2014年1月26日閲覧).
- 39) 国土交通省: 造成宅地滑動崩落緊急対策事業の創設について, http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tk1_000003.html (2014年1月26日閲覧).
- 40) 星野愛子, 宮島昌克: 近年の地震被害を考慮した上水道管路の被害予測式の改良に関する研究, 第5回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp. 20-26, 2013.
- 41) 楢田泰子, 池尻大介: 管路被害集中地域の地形や噴砂痕と被害箇所との関係, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, pp. 281-282, 2013.
- 42) 築地拓哉, 寺嶋黎, 庄司学, 永田茂: 東北地方太平洋沖地震で被災した上水道配水管の被害分析及びそれを踏まえた被害率曲線の構築, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, pp. 283-284, 2013.
- (2014. 1. 29 受付)

INVESTIGATION OF DAMAGE RATIO OF WATER DISTRIBUTION PIPELINE IN SENDAI CITY AFTER THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Yoshihisa MARUYAMA, Tomohiro ITO, Kazue WAKAMATSU
and Shigeru NAGATA

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the moment magnitude of 9.0 caused severe damage to lifeline systems. In Sendai City, Miyagi Prefecture, where is the most populated city in Tohoku district, the suspension of water supply was occurred at approximately 230,000 family units. This study investigates the relationship between the damage ratio of water distribution pipeline and ground motion intensity in Sendai City during the earthquake. The damage ratios in the developed hilly areas are compared with those in lowland considering the ground motion intensity. Based on the results, the use of correction coefficient for the developed hilly area is proposed to predict the number of pipe breaks of water distribution pipeline.