

2011年東北地方太平洋沖地震において被災した 上水道配水管網の被害の傾向 —茨城県潮来市および神栖市の事例分析—

築地 拓哉¹・寺嶋 黎²・庄司 学³・永田 茂⁴

¹学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:s1220894@u.tsukuba.ac.jp

²非会員 筑波大学理工学群工学システム学類 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:s091121@u.tsukuba.ac.jp

³正会員 筑波大学システム情報系准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail:gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

⁴正会員 鹿島建設(株)技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:nagata-shigeru@kajima.com

2011年東北地方太平洋沖地震において被害が顕著であった茨城県潮来市および神栖市の上水道配水管網の被害について、当該管理主体に対するヒアリング調査を行い、管路の敷設位置、被害箇所、管種・管径および地盤条件の情報を取得した。管路の被害率として被害箇所数を敷設延長で除したものと定義し、管種・管径および微地形の観点からそれらの被害率と計測震度およびPGVの空間分布との関係を分析した。

Key Words : *the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, water supply system, damage ratio, material property, diameter of pipes, microtopography, instrumental seismic intensity*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、上水道システムにおいて甚大な被害が生じ¹⁾、具体的には、最大187市町村において最大2,105,091戸の大規模な断水が発生した²⁾。それらの要因としては、津波による被害に加え、地震動および液状化により多様な損傷モードの被害が発生したためである。

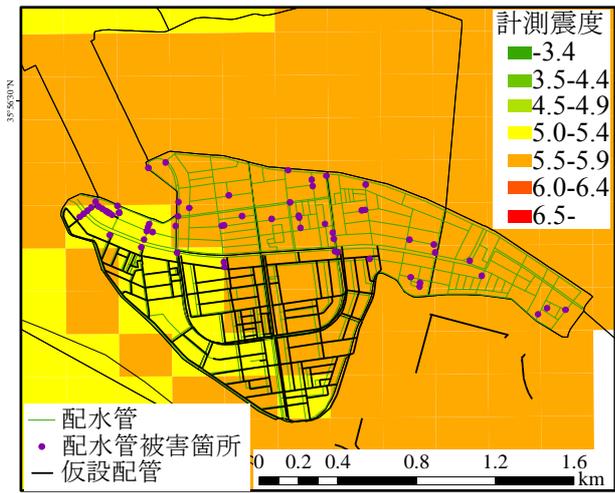
上水道システムの中でも、配水管網の被害を分析した研究の一例として、磯山ら³⁾が1995年兵庫県南部地震における芦屋市と西宮市の被害データに基づき、標準被害率曲線の構築を試みている。磯山らの成果は日本水道協会の配水管の被害予測⁴⁾に用いられている。高田ら⁵⁾は兵庫県南部地震の芦屋市、尼崎市、神戸市、西宮市および大阪市における被害データにより、被害箇所数を配水管敷設延長で除した値から被害予測式および管種、口径および液状化の程度に応じた補正係数を算出している。丸山・山崎⁶⁾は兵庫県南部地震および2000年代に発生した大地震の配水管網の被害データより铸铁管(CIP)および塩ビ管(VP)、ダクタイル铸铁管(DIP)等、管種ごとの被害率曲線を構築した。また、能島⁷⁾は脆弱性指数を提案し、水道年鑑のデータを用いて配水管の地

震脆弱性評価を行い、耐震化率の経年推移を全国規模で明らかにしている。また、震災以降では那波ら⁸⁾が、被害が顕著であった都市の上水道および下水道の被害データに基づき、それらの被害率と計測震度との関係を分析している。永田ら⁹⁾は仙台市の配水管網の被害データから、地盤条件、管種・管径および管路の耐震化率とPGV(Peak Ground Velocity)との関係を示している。武田ら¹⁰⁾は、宮城県下9市において、被害数を管路延長で除した被害率を管種、地盤条件と速度応答スペクトルおよびその最大周期との関係から分析している。それらの先行研究を踏まえ、今回の震災での分析データを加えた上で、より高度な配水管被害推計が喫緊の課題となっている。

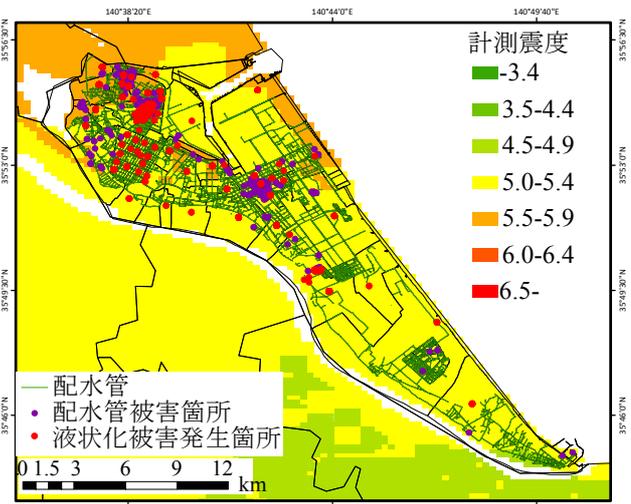
本研究では、これらの先行知見をもとに、東北地方太平洋沖地震において、上水道配水管網の被害が顕著であった茨城県潮来市および神栖市を取り上げ、被害の傾向を分析する。

2. 分析対象データおよび分析方法

図-1には、茨城県潮来市および神栖市の配水管網と共に、それらの被害箇所および地震動強さの分布を示す。地震動強さの分布としては、後述するよう

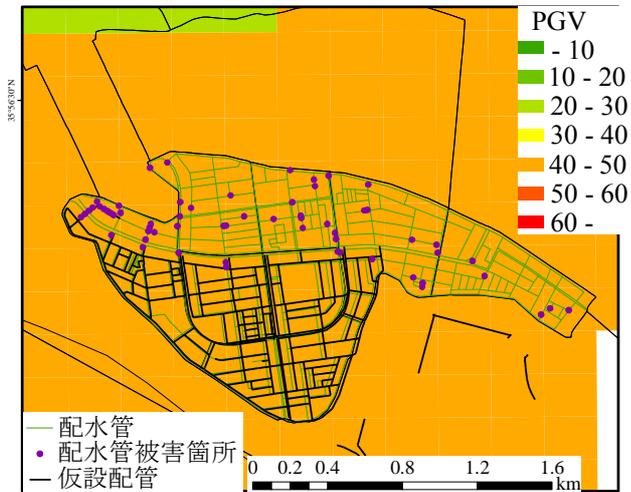


i) 潮来市日の出地区

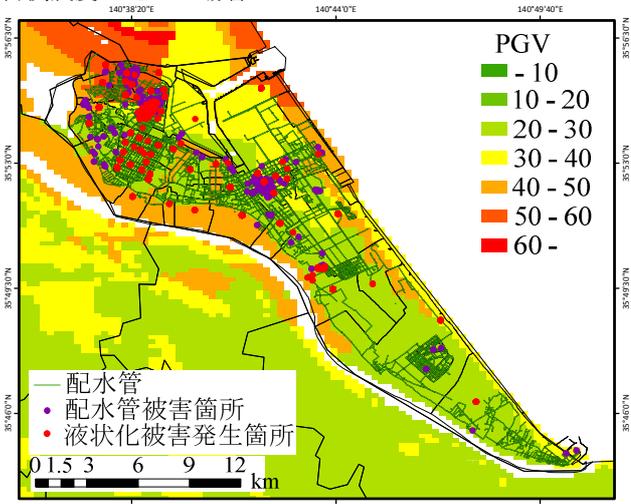


ii) 神栖市

(a) 地震動強さの指標を計測震度 IJ とした場合



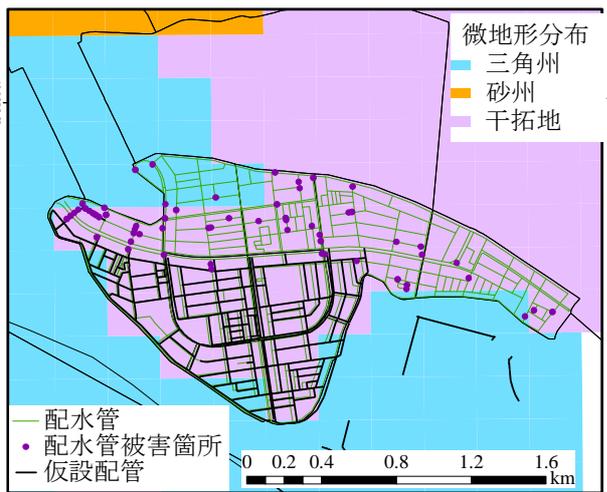
i) 潮来市日の出地区



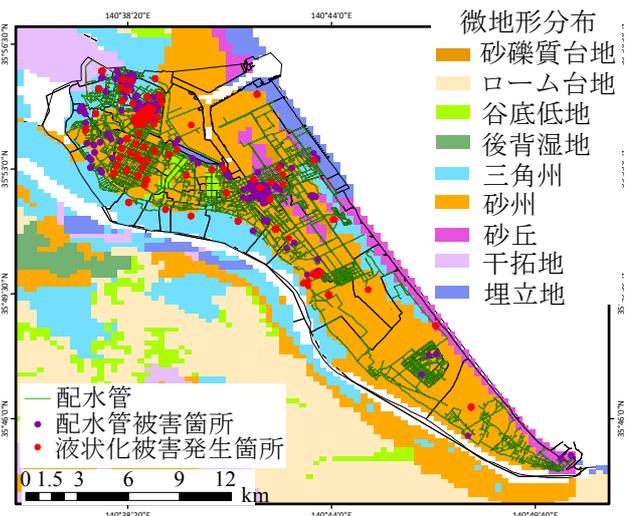
ii) 神栖市

(b) 地震動強さの指標を PGV とした場合

図-1 潮来市日の出地区および神栖市における配水管網およびその被害箇所と地震動強さの空間分布



(a) 潮来市日の出地区



(b) 神栖市

図-2 潮来市日の出地区および神栖市における配水管網およびその被害箇所と微地形分布

に計測震度 IJ と PGV を用いる。潮来市においては、特に被害が顕著であった日の出地区についてのデー

タのみ扱っている。更に、潮来市日の出地区のデータにおいては、今回の分析には用いないが、管路被

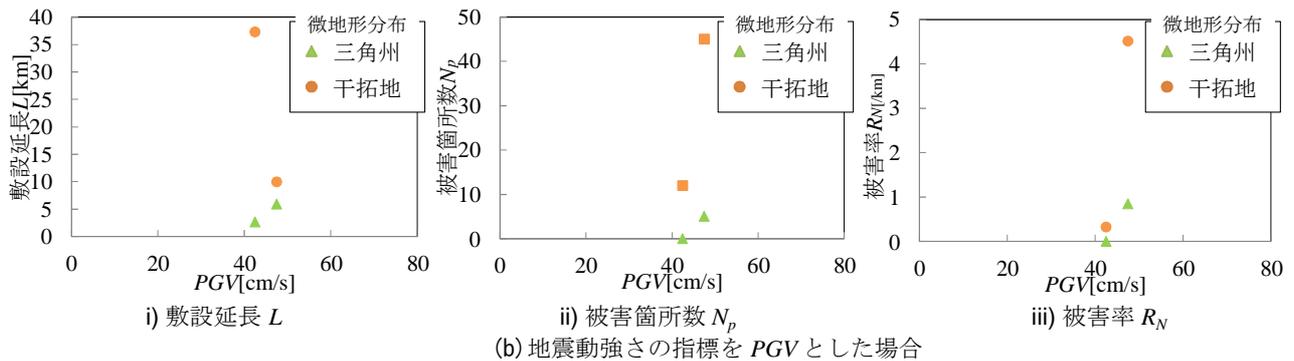
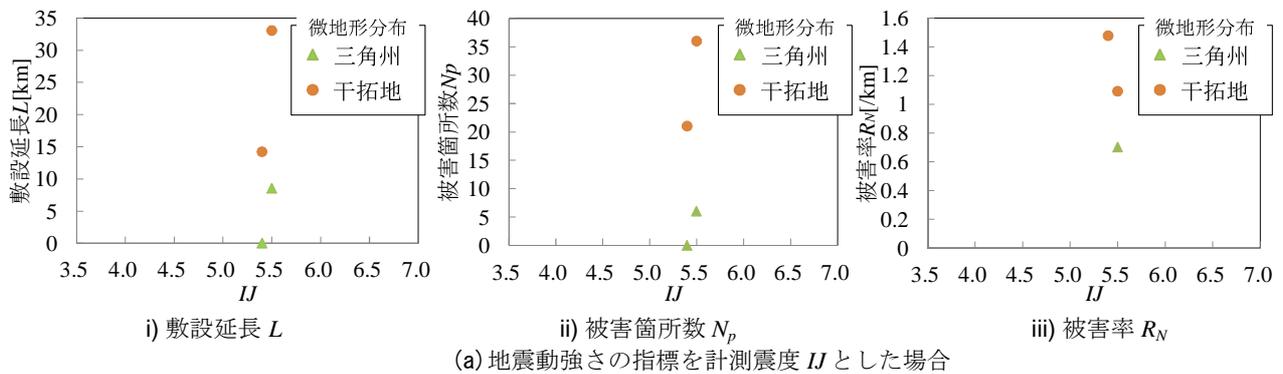


図-3 潮来市日の出地区における微地形区分ごとの敷設延長 L 、被害箇所数 N_p および被害率 R_N と地震動強さとの関係

害箇所を示す別の指標として仮設配管の位置を示している。また、神栖市においては液状化の発生箇所データのデータが得られたので併せて示す。図-2には、潮来市日の出地区および神栖市の管路敷設位置とそれらの被害箇所、および微地形分布を示す。なお、微地形分布に関してはJ-SHIS¹¹⁾の250mメッシュ単位の微地形分布を利用している。

図-1、図-2に示す被害を定量化する指標としては、被害箇所数 N_p を管路敷設延長 L で除した次式に示す被害率 R_N を適用する。

$$R_N = \frac{N_p}{L} \quad (1)$$

配水管被害と地震動強さの関係を分析する際には、先述した図-1における地震動強さの指標として計測震度 IJ および PGV を用いる。その際には、K-NET、KiK-net¹²⁾により公開されている強震観測波形、および気象庁¹³⁾により公開されている強震観測波形ならびに震源データに基づき、櫻井ら¹⁴⁾が、Simple Kriging法による空間補間を適用し、計測震度 IJ および PGV を250mメッシュ単位で推定されたものを用いている。櫻井ら¹⁴⁾は、各強震観測点における IJ に末富ら¹⁵⁾が構築した地盤増幅度を適用し、工学的基盤面における IJ_{b600} を求めている。これより得られた IJ_{b600} から、Simple Kriging法により各メッシュにおける IJ_{b600} を推定している。Simple Kriging法に適用するトレンド成分には司・翠川¹⁶⁾の距離減衰の式の形を用いている。

一方、 PGV については、まず加速度波形にフィルタ処理をした後に積分値を求め、その上で、EW、

NSの水平2方向の速度波形を時刻歴の中で合成し、その中で最大となる速度を当該観測点における PGV として定義している。K-NET、KiK-netの加速度波形の処理に関しては、それらの平均値を引いて基線補正し、通過領域周波数0.1Hz、阻止領域周波数0.05Hzのバターースハイパスフィルタ¹²⁾を通して PGV を求めている。気象庁のデータの処理に際しては、周期5秒以上をカットする積分漸化式¹⁷⁾に基づき PGV を求めている。以上より求めた各強震観測点における PGV に IJ と同様の方法により、藤本・翠川¹⁸⁾が構築した地盤増幅度 ARV を適用し、工学的基盤面における PGV_{b600} を求めている。これより得られた PGV_{b600} から、上述したSimple Kriging法により各メッシュにおける PGV_{b600} を推定している。Simple Kriging法に適用するトレンド成分には IJ と同様に司・翠川の距離減衰の式の形を適用している。

3. 被害の傾向

(1) 微地形区分の観点から見た被害の傾向

図-3、図-4には茨城県潮来市日の出地区および神栖市における配水管敷設延長 L 、被害箇所数 N_p 、および被害率 R_N と計測震度 IJ または PGV との関係を示す。図中では、 PGV の区間を5[cm/s]としている。

図-3より潮来市日の出地区では干拓地における被害が卓越し、 $IJ=5.4, 5.5$ において $R_N=1.48, 1.08$ [箇所/km]と1を超える R_N を示しており、甚大な被害が生じている。三角州においては、 $IJ=5.5$ において $R_N=0.70$ とそれに準ずる大きな被害が生じている。 PGV の観点からは、干拓地において $45 \leq PGV <$

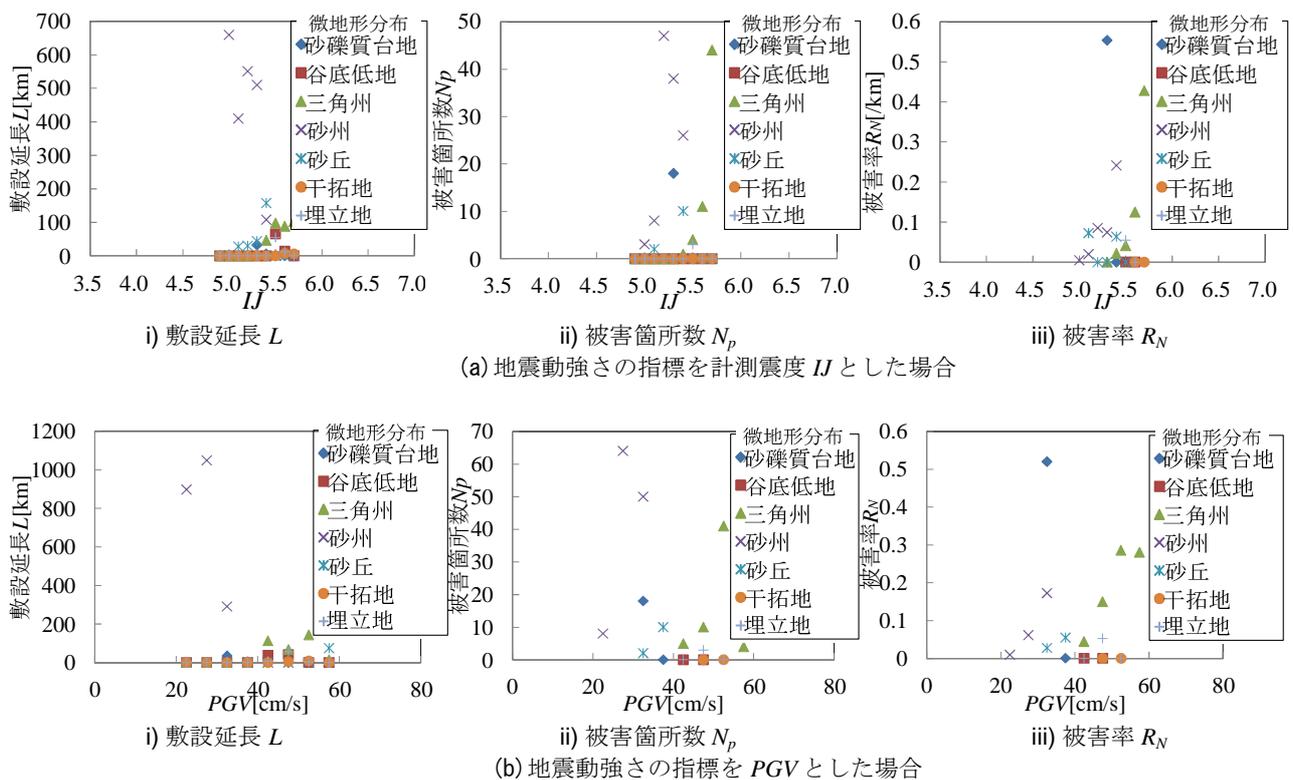


図-4 神栖市における微地形区分ごとの敷設延長 L 、被害箇所数 N_p および被害率 R_N と地震動強さとの関係

50[cm/s]の区間において R_N の最大値4.51[箇所/km]と突出して高い値を示している。また、三角州においては $45 \leq PGV < 50$ [cm/s]で $R_N=0.85$ [箇所/km]と高い値を示している。これは、潮来市日の出地区が沼を埋め立てられた地形が支配的であり、軟弱地盤において甚大な液状化被害^{19),20)}を受けたためである。

一方、図-4より、神栖市の被害の傾向については、砂礫質台地で $IJ=5.3$ において $R_N=0.55$ [箇所/km]となり、最大値を示している。PGVの観点からも同様に砂礫質台地において $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]の区間において $R_N=0.52$ [箇所/km]となり、最大値を示す。砂礫質台地における被害はいずれも神栖市知手中央において発生しているが、これらの地点は砂丘および砂丘に挟まれた低地における荒地を造成することで市街化されており、それらの地点の液状化が顕著であったためである²⁰⁾。知手中央での配水管被害は文献²⁰⁾と比較すると液状化した空間領域と相関が強いことが示唆される。同様に図-1からも配水管被害箇所と液状化発生箇所との相関が強いといえる。砂礫質台地に次いで三角州の被害が大きくなっており、 $IJ=5.7$ において $R_N=0.43$ [箇所/km]を示している。PGVの観点からは $50 \leq PGV < 55$ [cm/s]において $R_N=0.29$ [箇所/km]を示す。神栖市において最も支配的である砂州の被害は砂礫質台地、三角州に次いで高い被害率を表しており、 $IJ=5.4$ において $R_N=0.24$ [箇所/km]、 $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]で $R_N=0.17$ [箇所/km]を示す。

(2) 管種・管径の観点から見た被害の傾向

ここでは管種の略号として、石綿セメント管をACP、铸铁管をCIP、ダクタイト铸铁管をDIP、塩

化ビニル管をVP、耐衝撃硬質塩化ビニル管をHIVP、ゴム輪型硬質塩化ビニル管をVPRRとして以降の分析において用いる。

管径については磯山ら³⁾の分類方法に基づき、全体を管径100mm未満、100mm以上200mm未満、200mm以上500mm未満、500mm以上の4区分に分類し、それぞれを管径100mm未満、管径100-200mm、管径200-500mm、管径500mm以上と表す。潮来市日の出地区では管径40mmから300mm、神栖市では管径20mmから500mmの配水管がそれぞれ敷設されている。

また、以降の管種・管径の分析では被害が支配的であった潮来市日の出地区の干拓地、神栖市の砂州をそれぞれ分析対象とする。

図-5には、潮来市日の出地区の干拓地における地震動強さと管路被害との関係を管種の観点から示す。IJを指標とすると、VPが $IJ=5.4$ において $R_N=1.52$ [箇所/km]と最大値を示した。DIPは $IJ=5.5$ で $R_N=1.49$ [箇所/km]とVPに準じる値を示した。PGVの観点からは、DIPが $45 \leq PGV < 50$ [cm/s]において $R_N=18.6$ [箇所/km]と最大値を示し、VPが $45 \leq PGV < 50$ [cm/s]において $R_N=4.28$ [箇所/km]と次いで大きな値を示した。PGVを指標とした際に、DIPの R_N がVPの R_N より高い値を示したのは、DIPの敷設延長 $L=0.16$ [km]に対して被害箇所数 N_p が3箇所と非常に大きかったためである。

図-6には、潮来市日の出地区の干拓地における地震動強さと管路被害の関係を管径の観点から示す。IJを指標とすると、管径100mm未満が $IJ=5.4$ において $R_N=1.86$ [箇所/km]と最大値を示した。準じて管径200-500mmが $IJ=5.5$ において $R_N=1.49$ [箇所/km]と大き

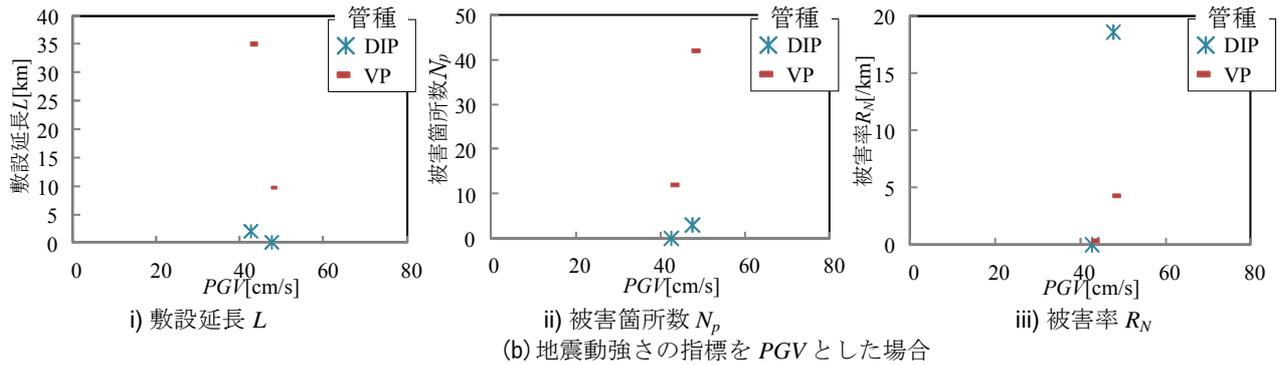
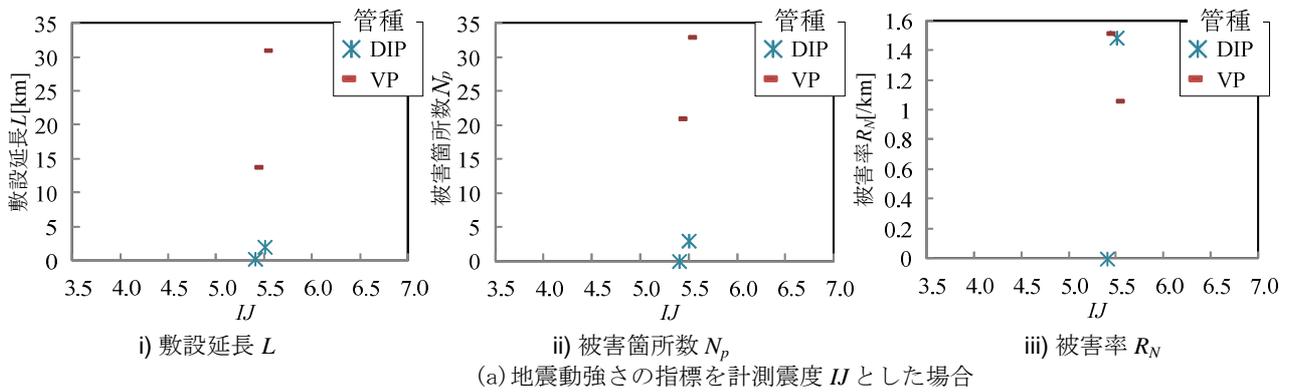


図-5 潮来市日の出地区の干拓地における管種ごとの敷設延長 L 、被害箇所数 N_p および被害率 R_N と地震動強さとの関係

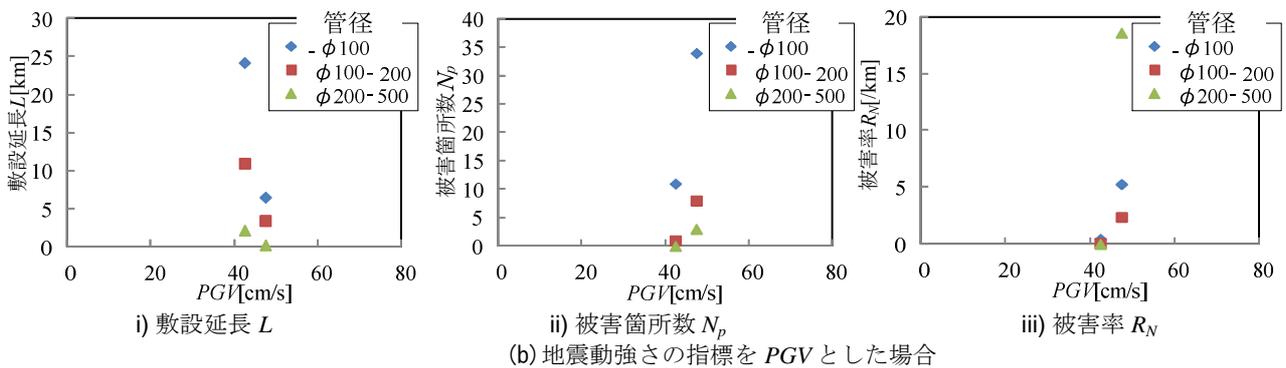
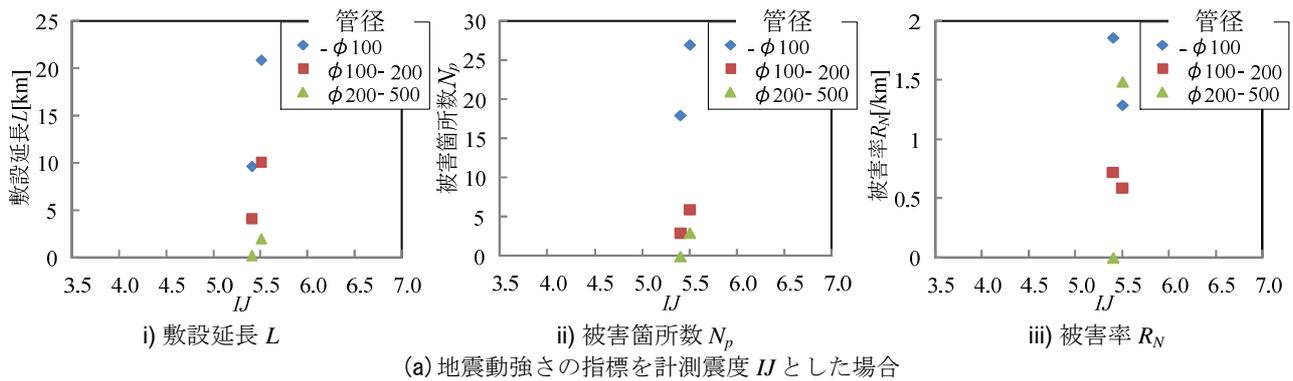


図-6 潮来市日の出地区の干拓地における管径ごとの敷設延長 L 、被害箇所数 N_p および被害率 R_N と地震動強さとの関係

な値を示した。 PGV の観点からは、管径200-500mmが突出して大きく、 $45 \leq PGV < 50 [cm/s]$ において $R_N = 18.6 [箇所/km]$ と最大値を示し、次いで管径100mm未満が同じ $45 \leq PGV < 50 [cm/s]$ において $R_N = 5.3 [箇所/km]$ を示した。管径別の分析においては、既往の研究知見として文献3)から文献6)より同程度の地震動

強さに曝露された場合、管径の小さい管ほど R_N が高くなる傾向がある。それに対して潮来市日の出地区の場合に、管径200-500mmの比較的大きな管が高い R_N を示したのは、管種の観点からの分析と同様に、地震動に曝露された L に対して N_p の値が3[箇所/km]と非常に大きかったためである。以上より潮来市日

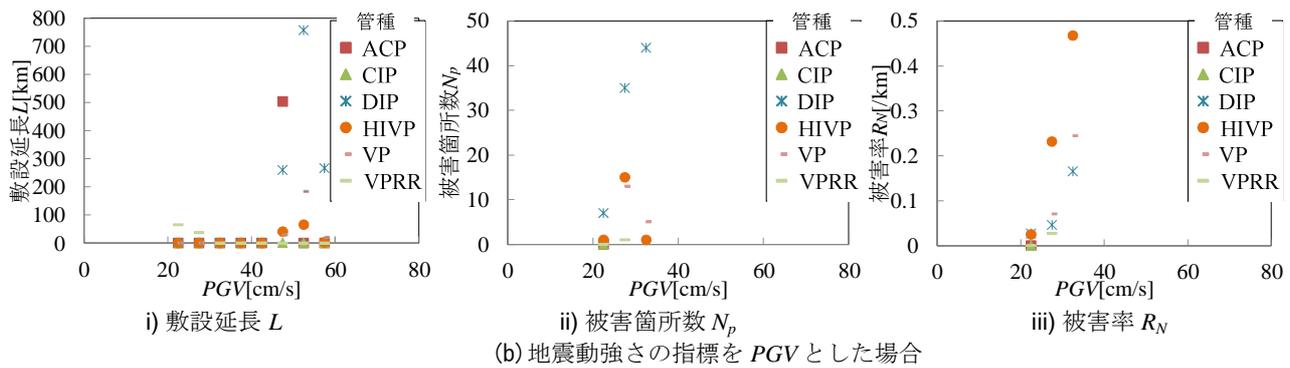
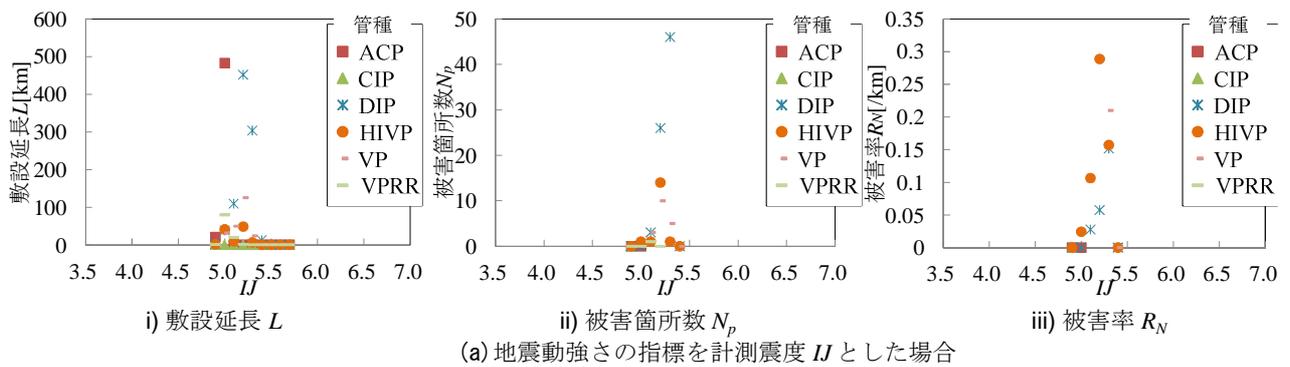


図-7 神栖市の砂州における管種ごとの敷設延長 L 、被害箇所数 N_p および被害率 R_N と地震動強さとの関係

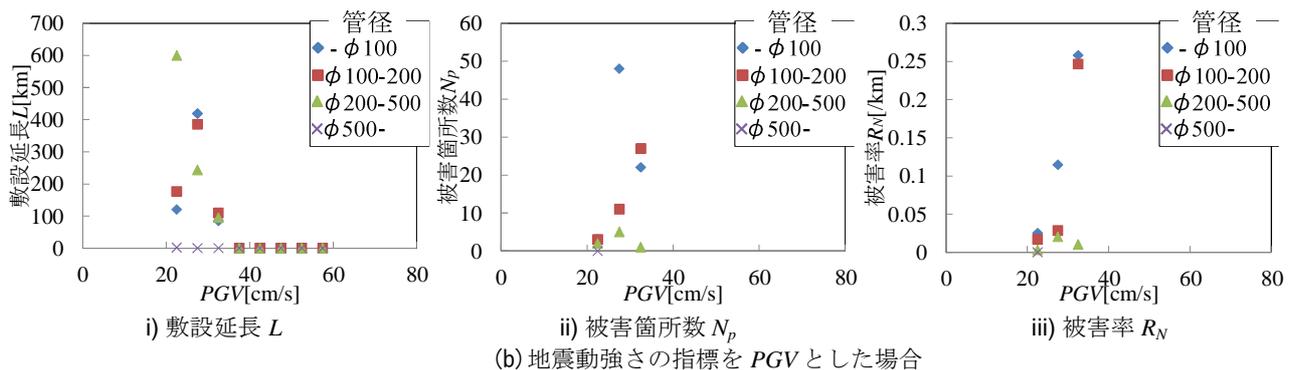
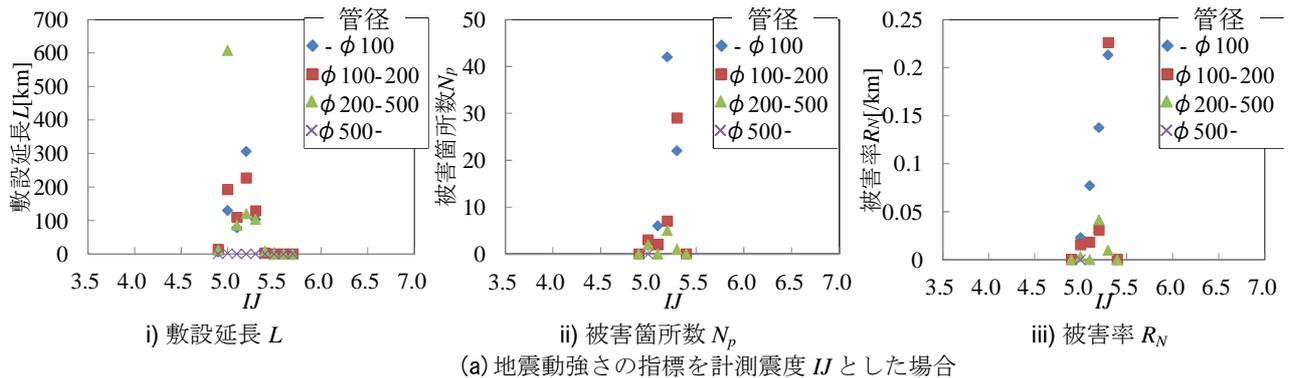


図-8 神栖市の砂州における管径ごとの敷設延長 L 、被害箇所数 N_p および被害率 R_N と地震動強さとの関係

の出地区において、管種ではVP、管径としては管径100mm未満が被害の支配的要因となっていることが明らかである。

図-7には、神栖市の砂州における管路被害と地震動強さの関係を管種の観点から示す。 IJ を指標とすると、HIVP が $IJ=5.2$ において $R_N=0.29$ [箇所/km] を示し最大となった。 準じてVPが $IJ=5.3$ において

$R_N=0.21$ [箇所/km] と大きな値を示した。 PGV の観点からは、同様にHIVPが $30 \leq PGV < 35$ [cm/s] において $R_N=0.47$ [箇所/km] と突出して高い値を示した。 それに準じてVPが $30 \leq PGV < 35$ [cm/s] において、 $R_N=0.24$ [箇所/km] と高い値を示した。

図-8には、神栖市の砂州における管路被害と地震動強さの関係を管径の観点から示す。 IJ を指標とす

ると、管径100-200mmが $IJ=5.3$ で $R_N=0.23$ [箇所/km]と最大値を示し、次いで管径100mm未満が同じく $IJ=5.3$ で $R_N=0.21$ [箇所/km]と大きな値を示した。PGVの観点からは管径100mm未満で $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]において $R_N=0.26$ [箇所/km]と最大値を、管径100-200mmが同じく $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]において $R_N=0.25$ [箇所/km]と準じて大きな値を示した。以上より神栖市においては、管種ではVP、管径については管径100mm未満、および管径100mmから200mmの小さな管の被害が支配的であった。

IJ についての分析、PGVについての分析ともに、地震動強さが増加するにつれ、 R_N も大きくなっていくこと、管径の小さい管ほど高い R_N を記録する傾向が確認できた。 IJ 、PGVともに一定以上の値になると R_N は減少する。その値は、 IJ においてはおよそ5.5以上、PGVにおいてはおよそ50[cm/s]以上だが、これはその地震動強さに曝露された敷設延長 L が非常に短いためであると考えられる。

4. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震において、上水道配水管網の被害が顕著であった茨城県潮来市および神栖市を取り上げ、上水道配水管網の被害と管種・管径、地盤条件と地震動強さの空間分布との関係を分析した。得られた知見は以下ようになる。

- (1) 潮来市日の出地区では干拓地における被害が卓越し、計測震度 $IJ=5.4$ において被害率 $R_N=1.48$ [箇所/km]、PGVが $45 \leq PGV < 50$ [cm/s]で $R_N=4.51$ [箇所/km]と最大値を示した。神栖市では、砂礫質台地において $IJ=5.3$ において $R_N=0.55$ [箇所/km]、PGVが $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]において $R_N=0.52$ [箇所/km]と最大値を示した。これらの被害が甚大であった微地形はいずれも液状化被害の空間分布と相関が強いことが示唆された。
- (2) 潮来市日の出地区、神栖市の両地域において、管種では塩化ビニル管VP、管径では100mm未満の配水管被害が支配的であった。VPが最大の被害率 R_N を示すのは、両地域で計測震度 $IJ=5.3$ 、5.4であり、PGVの観点からは潮来市日の出地区において、 $45 \leq PGV < 50$ [cm/s]、神栖市では $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]とやや小さくなった。管径100mm未満の配水管が最大の被害率 R_N を示すのは、管種と同様に $IJ=5.3$ 、5.4であり、PGVの観点からは潮来市日の出地区で、 $45 \leq PGV < 50$ [cm/s]、神栖市で $30 \leq PGV < 35$ [cm/s]となった。

謝辞：本研究を実施するに当たり、茨城県潮来市および神栖市の関連部局の皆様方には多大なご協力を得ました。また、本研究は筑波大学と両市との震災復興連携協定の締結に基づき、筑波大学プロジェクト「巨大地震による複合災害の統合的リスクマネジメント」（研究代表者：八木勇治准教授、研究分担者：庄司学）の助成を得て実施されました。

参考文献

- 1) 鋏田泰子, 片桐信: 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, 第10章 水道施設の被害 http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/Chapter10_0.pdf, 2012.9.18.閲覧
- 2) 厚生労働省: 東日本大震災関連情報 | 緊急情報 | 厚生労働省, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000014j15.html>, 2012.9.18.閲覧
- 3) 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67巻, No.2, pp.25-40, 1998.
- 4) 日本水道協会: 地震による水道管路の被害予測, 1998.
- 5) 高田至郎, 藤原昌弘, 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, 第70巻, No.3, pp.21-37, 2001.
- 6) 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, 第30回土木学会地震工学論文集, 第30巻, pp.565-574, 2009.
- 7) 能島暢呂: 脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価～上水道排水管網への適用～, 地域安全学会論文集, No.10, pp.137-146, 2008.
- 8) 那波悟志, 築地拓哉, 庄司学, 永田茂: 2011年東北地方太平洋沖地震における上水道および下水道の被害分析—茨城県および千葉県の情報のでられた被災都市の傾向—, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第31-b巻), I_1194-I_1209, 2012.
- 9) 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.
- 10) 武田康夫, 高田至郎, 山本祐司, 坂本宏昭: 東北地方太平洋沖地震による水道管路被害とその要因, 第63回全国水道研究発表会講演集, pp.322-323, 2012.
- 11) 防災科学技術研究所: J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> 2012.9.18.閲覧
- 12) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク K-NET、KiK-net: <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>, <http://wwwold.k-net.bosai.go.jp/k-net/> 2012.9.18.閲覧
- 13) 気象庁: 強震波形(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震), http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html, 2012.9.18.閲覧
- 14) 櫻井俊彰, 庄司学, 高橋和慎, 中村友治: 2011年東北地方太平洋沖地震における斜面に関わる道路構造物の被害分析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第31-b巻), I_1315-I_1325, 2012.
- 15) 末富岩雄, 石田栄介, 磯山龍二: 空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討, 第28回地震工学研究発表会, 土木学会, 2005.
- 16) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999.
- 17) 気象庁 気象業務支援センター: 強震観測報告2007年・2008年(CD-ROM)
- 18) 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.

19)Tsukamoto, Y., Kawabe, S. , Kokusho, T. and Araki, K. :Soil Liquefaction Observed at Areas located along the Lower Stream of Tonegawa River during 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan, pp.731-738, 2012.

20)関東地方整備局：東北地方太平洋沖地震による関東地

方の地盤液状化現象の実態調査結果について、
<http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html>
2012.9.18.閲覧

DAMAGE ASSESSMENT ON WATER SUPPLY SYSTEMS IN THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE - CASE STUDY FOR THE DATA AT ITAKO CITY AND KAMISU CITY -

Takuya TSUKIJI, Ray Terajima, Gaku SHOJI and Shigeru NAGATA

We analyze seismic damage data on buried distribution pipes at Itako city and Kamisu city in Ibaraki prefecture subjected to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake by carrying out interviews for related local government sectors. We quantify damage ratio named R_N for subject areas. R_N is defined by the ratio of number of physical damage points N_p to the related pipeline lengths L (km). We use instrumental seismic intensity (I) and peak ground velocity (PGV) as indexes of ground motion intensities and analyze the relationship between damage ratio and seismic ground motions from the viewpoint of materials of pipes, diameters, and microtopography.