

東北地方太平洋沖地震で被災した下水道污水管路網・敷設下の工学的基盤に作用した地震波に関する一考察

寺嶋 黎¹・庄司 学²

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: s1320944@u.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

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

東北地方太平洋沖地震では液状化により下水道污水管に甚大な被害が発生し、そのメカニズムの解明が求められている。そのためには、それらの敷設下の工学的基盤面に入射した地震波の特徴を明らかにし、表層地盤及び埋設管路の応答特性を明らかにする必要がある。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルに基づき、有限差分法による地震波の伝播シミュレーションを行い、液状化により甚大な被害を受けた茨城県神栖市及びひたちなか市に敷設された下水道污水管路網・敷設下の工学的基盤面に入射した地震波の特徴を明らかにした。

Key Words :the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, sewer buried pipeline, seismic damage, liquefaction, finite-difference method, seismic waveform

1. 目的

東北地方太平洋沖地震により、水処理系ライフラインとして重要な機能を担っている下水道システムに甚大な被害が発生した¹⁾。下水道埋設管の被害分析の研究事例として、例えば、庄司ら²⁾は強震動及び液状化による複合作用が深刻な被害をもたらした茨城県及び千葉県市区を対象に下水道埋設管路の地震被害率曲線を構築している。しかしながら、それらの埋設地盤は地下水位、透水特性、液状化層並びに非液状化層の層厚などの力学的特性において相違が見られ³⁾、文献2)のような下水道埋設管の被害を巨視的に捉えるだけでは十分にその被害メカニズムを説明することができていない。そのためには、このような地盤の震動を励起させた地震波の特性に関する分析が重要であり、これを踏まえて表層地盤及び埋設管路の応答特性を明らかにする必要がある。

本研究では、文献2)の知見をもとに、液状化被害が顕著であった茨城県神栖市及びひたちなか市を対象とし、空間4次、時間2次精度の有限差分法⁴⁾を適用して下水道污水管路網・敷設下の工学的基盤(せん断波速度 $V_s=500\text{m/s}$ 相当)に作用した地震波を推計し、その特徴を分析する。

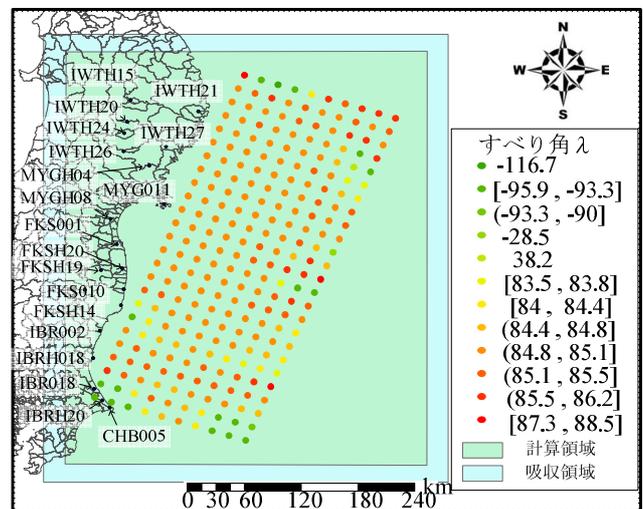


図-1 震源断層モデルと強震観測点の位置

2. 有限差分計算におけるモデル

震源断層モデルとしては図-1に示すYagi and Fukahata⁵⁾を採用した。なお計算波形との比較に用いる観測波形が得られた強震観測点を図-1に併せて示す。東北地方太平洋沖地震の震源断層モデルの既往研究としては他にもSuzuki *et al.*⁶⁾, Kurahashi and Irikura⁷⁾, 野津⁸⁾, Kubo and Kake-

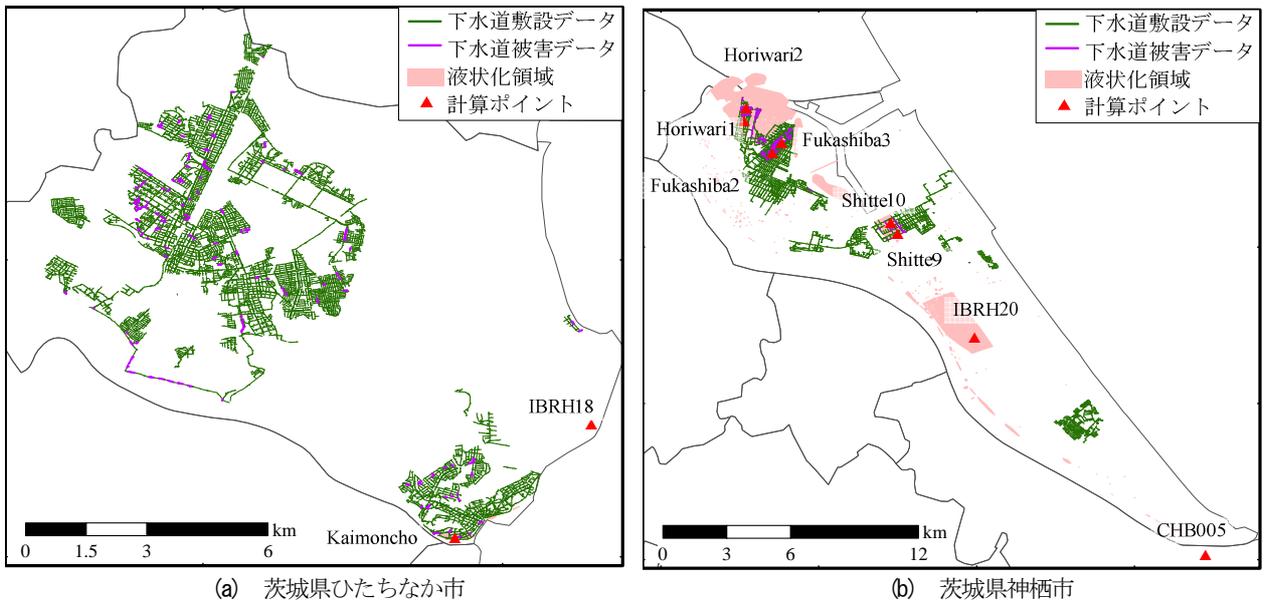


図-2 分析対象地区に敷設された下水道汚水管路網とその被害データ及び液状化領域（文献2）の図に加筆

表-1 計算に用いる地下構造の物性値¹¹⁾

層番号	V_p (m/s)	V_s (m/s)	密度 (kg/m^3)	Q_p^*	Q_s^*
D1	1800	500	1950	170	100
D2	2000	600	2000	204	120
D3	2100	700	2050	238	140
D4	2200	800	2070	272	160
D5	2300	900	2100	306	180
D6	2400	1000	2150	340	200
D7	2700	1300	2200	442	260
D8	3000	1500	2250	510	300
D9	3200	1700	2300	578	340
D10	3500	2000	2350	680	400
D11	4200	2400	2450	680	400
D12	5000	2900	2600	680	400
D13	5500	3200	2650	680	400
D14	5800	3400	2700	680	400
D15	6400	3800	2800	680	400
D16	7500	4500	3200	850	500
D17	5000	2900	2400	340	200
D18	6800	4000	2900	510	300
D19	8000	4700	3200	850	500
D20	5400	2800	2600	340	200
D21	6500	3500	2800	510	300
D22	8100	4600	3400	850	500

* Q_p , Q_s はともに1Hzにおける値

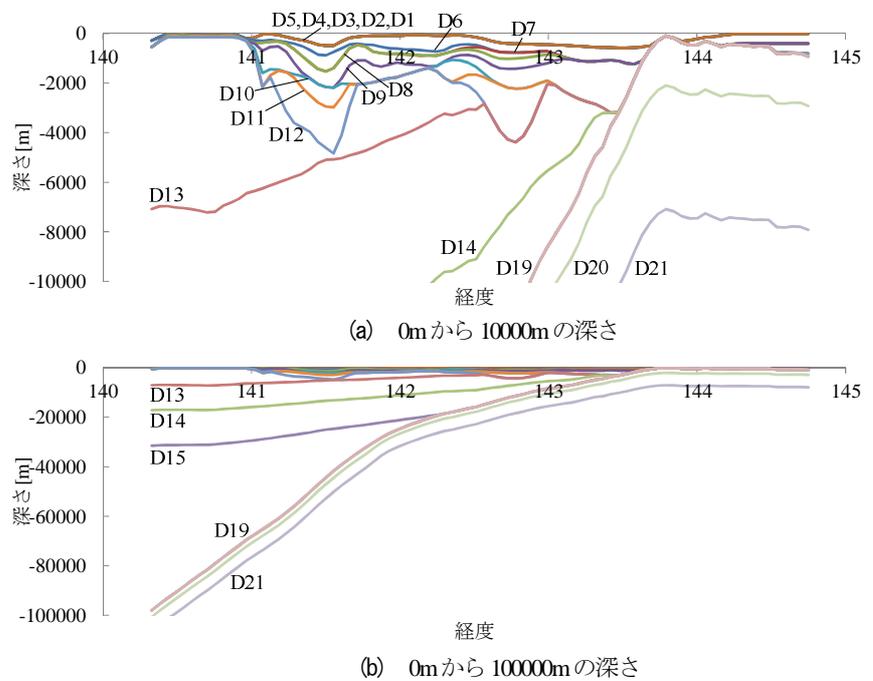


図-3 計算に用いる北緯37.5度における経度方向の地下構造（文献11）を元に筆者らが作成

hi⁹⁾, Ide and Aochi¹⁰⁾などが提案されているが、その中でも中遠地の観測点における地震波の再現性が良好であり、かつ津波波源との整合性も調和的であった、本モデルを採用した。当該モデルは走向が200度、傾斜角が12度であり、すべり角が図-1のように変化する計250個のサブフォールトで構成されている。各サブフォールトのモーメント速度がゼロ以下となる時間はその値がゼロと仮定し、6秒幅のSmoothed ramp functionを3秒おきに35個並べて震源時間関数をモデル化した。

図-2には本研究で分析対象とする地区と敷設された下水道汚水管路網及びその被害データを示す²⁾。また、図中には近傍の強震観測点と計算波形を算出する計算ポイントを併せて示す。計算ポイントは、液状化が確認され、かつ下水道汚水管の被害が集中した地点を採用している。

地下構造の物性値及び境界面の深度データは地震調査研究推進本部の全国1次地下構造モデル¹¹⁾により設定した。各層ごとの物性値を表-1に示し、境界面の1例を図-3に示す。また、せん断波速度 V_s が3km/sを越える地震基

表-2 計算条件

設定項目	設定値	
	Region I	Region II
上限周波数	0.5Hz	
サンプリング数	40000	
サンプリング周期	0.005[s]	
計算時間	200[s]	
メッシュサイズ	200*200*100	600*600*300
Region I と II の境界	8km	
吸収境界格子数	120	40
吸収境界領域の減衰定数	0.0025	0.0075

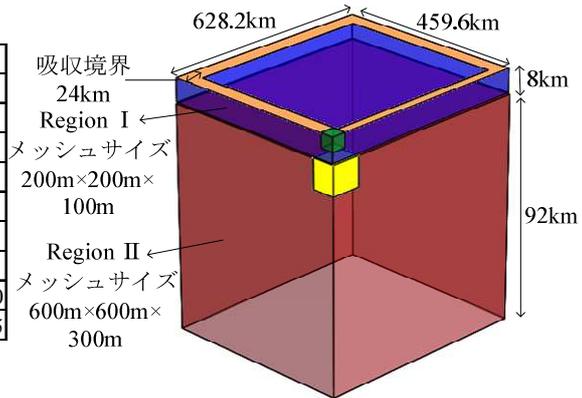


図-4 計算領域と格子サイズ

盤面(D13)を計算領域で走査し確認することで計算に用いる格子の不連続面の深度を8kmとした(図-4)。最上層における V_s は500m/sで上限周波数を0.5Hzと定めた結果、計算の安定性の観点から、不連続面以浅(Region I)は水平方向200m四方、鉛直方向100mの格子サイズ、不連続面以深(Region II)はその3倍の格子サイズとした。吸収境界は反射波の吸収率と格子数の関係を踏まえ、その格子数を文献4)で推奨された値の2倍、減衰定数をその値の1/2とした(表-2, 図-4)。

3. 計算波形と観測波形の比較

計算波形と観測波形¹²⁾を比較した結果が図-5である。観測波形に対しては、加速度波形に通過帯域0.02Hz、阻止帯域0.01Hz、通過帯域リップル3dB、阻止帯域減衰量10dBのバタワースハイパスフィルタを施した。また、速度波形には通過帯域0.01Hz-0.4Hz、阻止帯域0.001Hz以下及び0.6Hz以上、通過帯域リップル3dB、阻止帯域減衰量10dBのバタワースバンドパスフィルタを施した。計算波形には通過帯域0.01Hz-0.2Hz、阻止帯域0.005Hz以下及び0.5Hz以上、通過帯域リップル3dB、阻止帯域減衰量10dBのバタワースバンドパスフィルタを施した。また、計算波形のうなりが顕著な場合のみ上記の通過帯域の下限0.01Hzを0.02Hzあるいは0.03Hzに高めた。計算波形は震源断層の破壊開始時刻を0秒としているため、観測波形もそれに合わせて両者を比較している。なお、観測波形は、強震観測点の設置された地盤が良好な点及び文献6)、7)及び9)を参照し観測点を峻別した。

図-5より、IWTH15の計算波形は周期15秒から20秒程度の波が最初に生じるのに対し、観測波形では少し遅れて同様の周期を持った波が生じ、振幅については観測波形が多少小さくなっているものの、両者は良く一致する。IWTH21ではEW方向については40秒付近の振幅の大きな部分以外は整合性が低いが、NS及びUD方向のトレンドは計算波形と観測波形が一致した。IWTH20については、

特にEW方向において50秒付近の振幅が観測波形よりも計算波形が大幅に大きく生じているが、それ以外のトレンドは比較的良く一致している。IWTH24、IWTH27及びIWTH26では、振幅に多少の差異はあるものの、大きなトレンドは特にEW方向において良く再現できている。

宮城県の観測点MYGH04、MYGH08及びMYG011については、NS方向及びUD方向は再現性がやや落ちるのに対し、EW方向については全体のトレンドを良好に再現できている。

福島県の観測点は、60秒付近及び110秒付近のトレンドが良好に再現できているFKS001、60秒付近のトレンドが再現できているFKS010及びFKSH19、100秒付近の再現性が良いFKSH20及びFKSH14の3グループとなった。

茨城県の観測点であるIBR002については、EW方向の100秒から120秒付近のトレンドは良く一致しているが、それ以外の部分は再現性が低い。IBRH18については、EW方向の180秒及びNS方向の100秒付近のトレンドについてのみ再現できている。IBR018については200秒間中、振幅が0.1m/sを超えることがなく、特に振幅の再現性が低い。IBRH20及びCHB005についてはいずれの観測点においても振幅は0.1m/s未満となっており、再現性はやや低い。

以上より、岩手県及び宮城県については計算波形の再現性は良好であるが、福島県、茨城県及び千葉県についてはやや低いため、震源時間関数のモデルを修正し、地下構造の物性の見直しなどを行うことで計算波形の再現性を高める予定である。

4. 下水道污水管路網・敷設下の工学的基盤面における地震波形の特徴

液状化による下水道埋設管の被害が甚大であった地域について速度波形を算出した。図-2に赤マーカで示された地点のうち、液状化領域内に存在する7点の速度波形を図-6に示す。計算の開始時刻は全ての地点について一

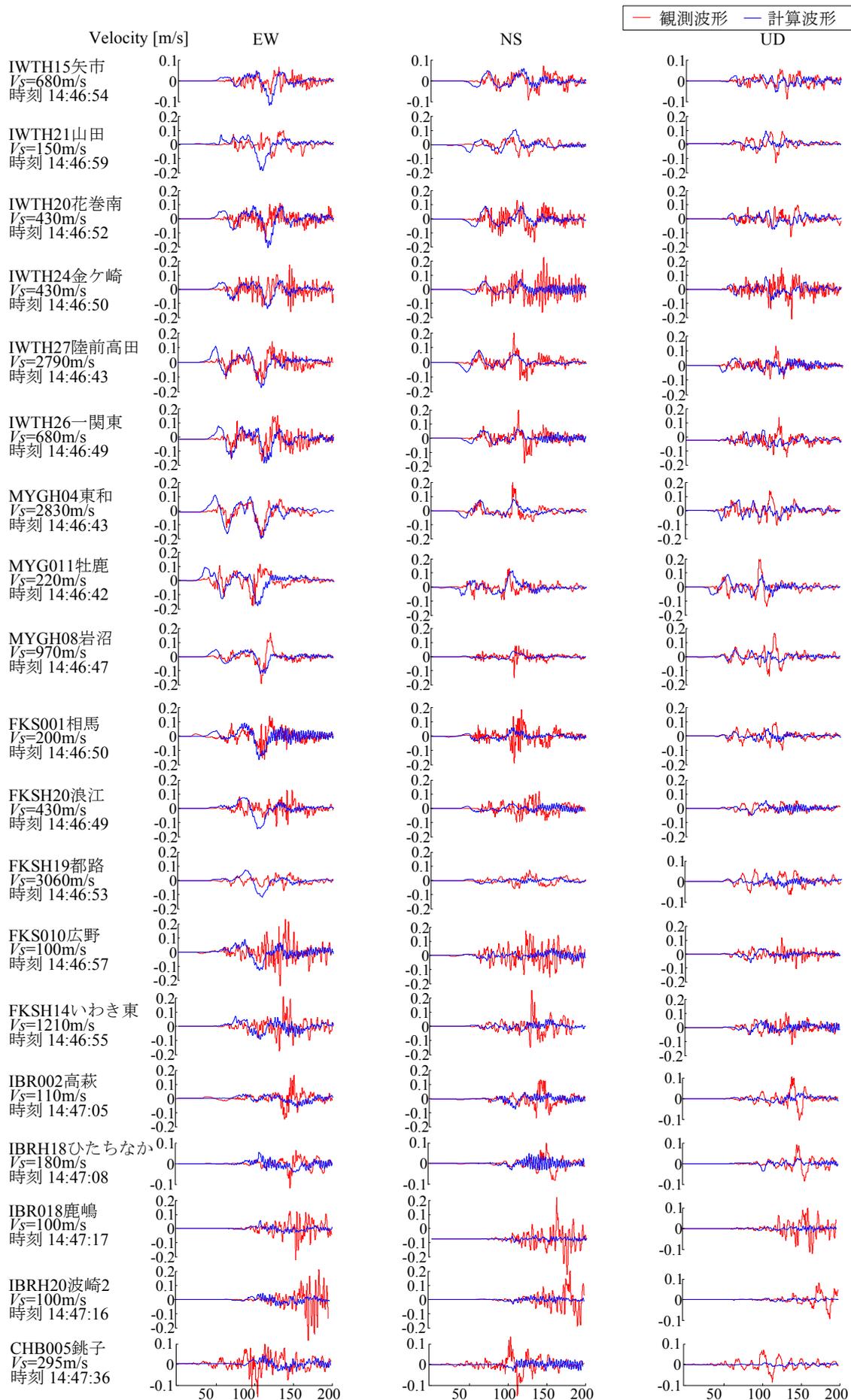


図-5 強震観測点における計算波形と観測波形の比較

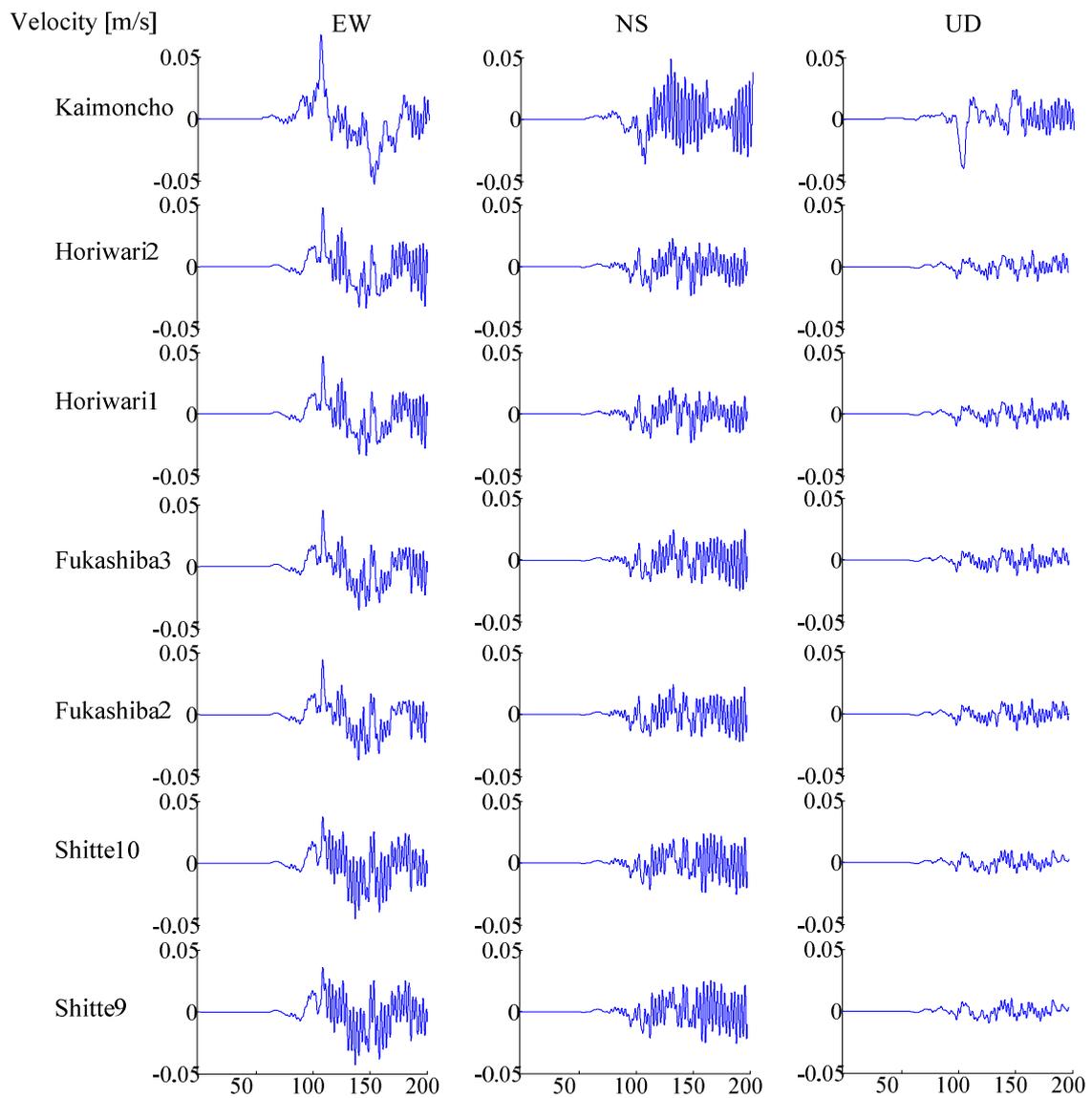
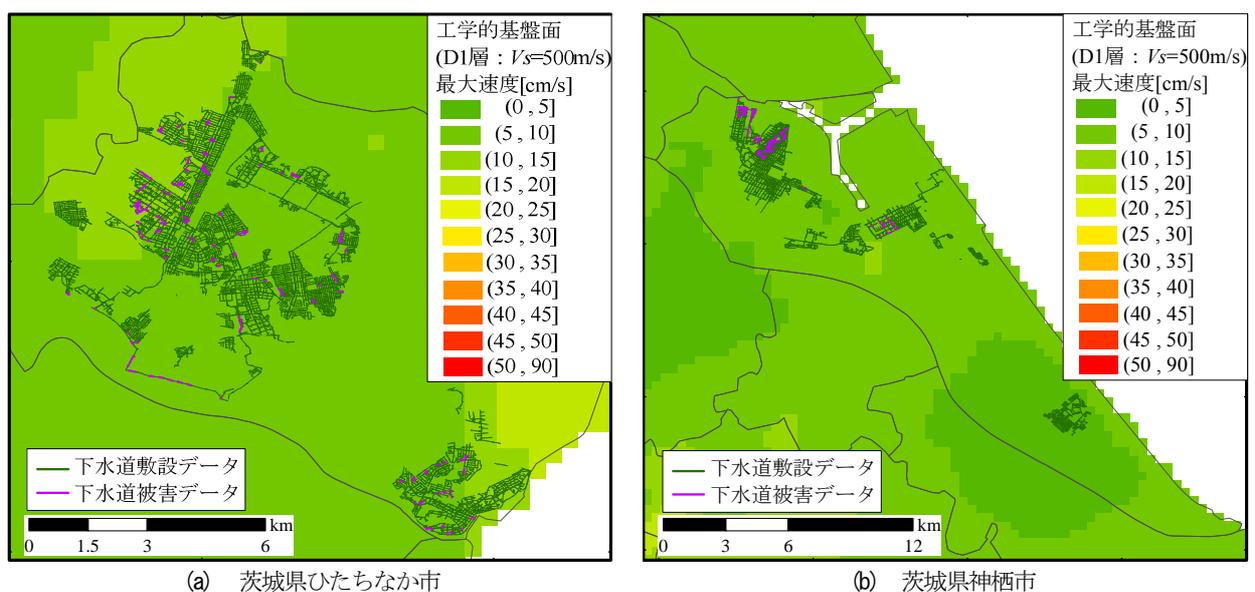


図-6 下水道汚水管路網・敷設下の工学的基盤面における計算波形



(a) 茨城県ひたちなか市

(b) 茨城県神栖市

図-7 分析対象地域の推定された工学的基盤面における最大速度 V_s^* と下水道汚水管路網

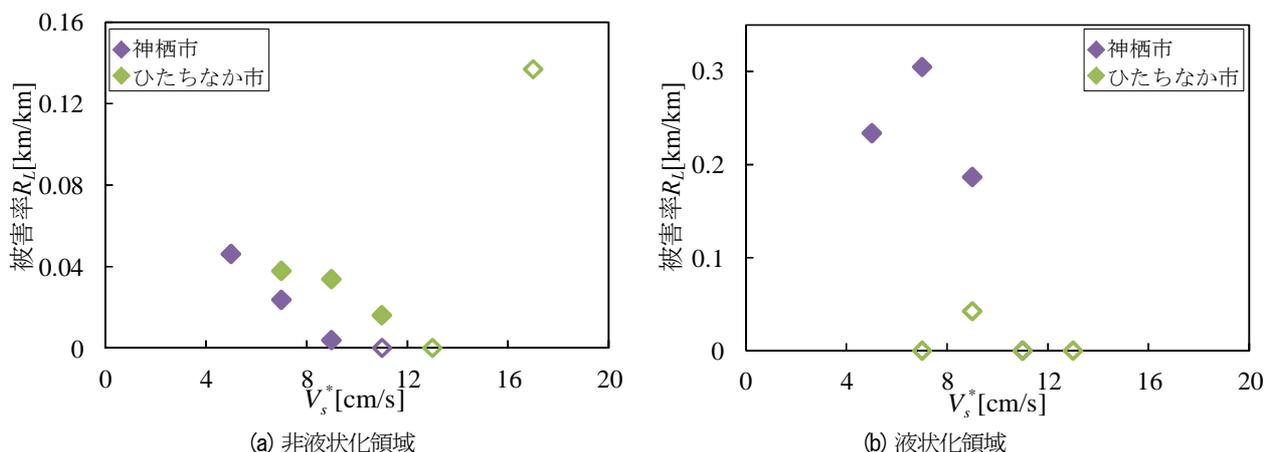


図-8 分析対象地域の非液状化領域及び液状化領域における下水道汚水管路網の被害率 R_L とその敷設下の工学的基盤面における最大速度 V_s^* との関係

律に気象庁による断層の破壊開始時刻2011年3月11日 14:46:18.12とした。

図-6をもとに周波数領域の分析を行うと、7地点全てに共通する特徴として、周期2.9秒程度の成分が支配的であった。また、地点ごとの計算波形の特徴として、ひたちなか市のKaimoncho (海門町)では他の地点と比較して2倍程度大きな振幅が生じ、EW方向に16.6秒の長周期の揺れが存在する。一方、神栖市において空間的にも近い位置に存在するHoriwari2 (堀割2丁目)、Horiwari1 (堀割1丁目)、Fukashiba3 (深芝南3丁目)及びFukashiba2 (深芝南2丁目)についてはトレンド、振幅についてもほとんど差異が見られなかった。Shitte10 (知手中央10丁目)及びShitte9 (知手中央9丁目)については先述の4地点と同程度の振幅とトレンドであるが、特にEW方向において周期2.98秒の相対的に短周期な波が発生している。

また、全ての格子点について計算された水平2方向の速度波形より最大値を抽出しその2軸合成値を最大速度 V_s^* と定義して、その空間分布を算出した。分析対象地域の下水道汚水管路網とその敷設下の工学的基盤面における最大速度 V_s^* の空間分布を図-7に示す。

図-7(a)より、茨城県ひたちなか市の下水道汚水管路網の大部分が $5 < V_s^* \leq 10$ [cm/s]の地震波に暴露されている。また、市の北西部及び南部が一部 $10 < V_s^* \leq 15$ [cm/s]となっている。沿岸部は更に $15 < V_s^* \leq 20$ [cm/s]の地震波に曝されているが、当該地区に下水道埋設管はほぼ敷設されていない。図-7(b)より、茨城県神栖市に敷設された下水道汚水管路は先述のひたちなか市と同様に大部分が $5 < V_s^* \leq 10$ [cm/s]の地震波に暴露された地区に存在する。また南東部には一部 $0 < V_s^* \leq 5$ [cm/s]という比較的弱い地震波に曝された管路が存在する。神栖市中央の知手付近にごく一部 $10 < V_s^* \leq 15$ [cm/s]が発生している地区が存在するが、敷設されている管路は短い。

文献2)では茨城県ひたちなか市及び神栖市を液状化の発生した地域、発生しなかった地域に区分し、それぞれ液状化領域及び非液状化領域と定義している。それらのデータを活用し地区に敷設された下水道汚水管を非液状化領域と液状化領域に区分し、それぞれについて V_s^* ごとの被害率を算出した。 V_s^* は区間幅2cm/sごとに算出し、被害率 R_L [km/km]は被害延長 L_d [km]を敷設延長 L [km]で除すことにより算出した。また、管種、管径及び地形区分の影響を取り除くため、文献2)の区分に従い、沖積平野に敷設された塩化ビニル管VPの被害率 R_L [km/km]と V_s^* との関係を図-8のように分析した。図中の白抜きプロットは敷設延長が5km以下のデータにより算出された被害率を示す。

図-8(a)より、非液状化領域において神栖市のデータでは $4 < V_s^* \leq 6$ [cm/s]において最大の被害率 $R_L = 0.046$ [km/km]を示した。敷設延長5km未満のデータではあるが、ひたちなか市のデータでは $16 < V_s^* \leq 18$ [cm/s]において最大の被害率 $R_L = 0.137$ [km/km]を示した。どちらの地域においても工学的基盤面相当では震源からの距離が遠く、15cm/s程度以下の低い最大速度 V_s^* となっているため、その大小によって被害率の有意な差は読み取れない。

図-8(b)より、液状化領域において神栖市のデータでは $6 < V_s^* \leq 8$ [cm/s]において最大の被害率 $R_L = 0.305$ [km/km]を示した。敷設延長5km未満のデータではあるが、ひたちなか市のデータでは $8 < V_s^* \leq 10$ [cm/s]において最大の被害率 $R_L = 0.042$ [km/km]を示した。

非液状化領域及び液状化領域の最大の被害率 R_L をそれぞれの分析対象地域で比較すると、神栖市では6.6倍、ひたちなか市(敷設延長5km未満のデータを含む)では0.3倍となった。

以上より、 $4 < V_s^* \leq 18$ [cm/s]の工学的基盤面の最大速度 V_s^* が液状化領域及び非液状化領域において被害率に大きく影響を与えているとは言い切れないため、地震波

形に対する振動数領域の分析を行い、表層の非線形化による影響を明らかにする予定である。

5. 結論

本研究では、東北地方太平洋沖地震の震源モデルを用いて空間4次・時間2次の有限差分シミュレーションを行うことで、液化化による下水道汚水管被害が甚大であった地域の工学的基盤面に作用する地震波の特徴を明らかにした。

観測波形と計算波形を比較した結果、岩手県及び宮城県においては大きなトレンドが一致し、良好な再現性を得た。一方で福島県、茨城県及び千葉県に関しては比較的再現性が低く、震源時間関数のモデルの修正、地下構造の物性値の見直しなどを行い、計算波形の再現性を高める予定である。

工学的基盤面の最大速度 V_s^* と下水道汚水管の被害率 R_L を比較すると、 V_s^* が15cm/s程度以下と低く、その大小による有意な被害率の差は見られなかった。従って地震波の時系列データが有する振動数領域の特徴が表層地盤の非線形化に及ぼす影響を今後分析する予定である。

謝辞：本研究を実施するに当たり、茨城県神栖市の液化化対策検討委員会の皆様には液化化被害のメカニズム等に関して多々御教授いただきました。本研究は、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）の助成を一部得て実施され、八木勇治准教授には震源断層モデルについて貴重な御助言を頂きました。防災科学技術研究所の青井真氏には、有限差分計算における不連続面や吸収境界条件の設定等について多くの御指導を頂きました。また、土木学会・地震工学委員会「水循環NW 災害軽減対策研究小委員会」（委員長：宮島昌克・金沢大学教授）の委員の皆様には広域液化化被害に関する貴重な情報を頂きました。ここに関連する全ての皆様方に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：東日本大震災の記録—国土交通省の災害対応—，<http://www.mlit.go.jp/common/000194077.pdf>
- 2) 庄司学，寺嶋黎，永田茂：下水道埋設管路の地震被害率曲線の構築，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.70，No.4（地震工学論文集第33巻），pp.I_921-I_946，2014.
- 3) 築地拓哉，寺嶋黎，庄司学，永田茂：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—茨城県潮来市及び神栖市の事例分析—，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.69，No.4（地震工学論文集第32巻），pp.I_260-I_279，2013.
- 4) 青井真，藤原広行：不連続格子を用いた4次精度差分法による波形合成，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp.875-880，1998.
- 5) Yagi, Y. and Fukahata, Y.: Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release, *Geophysical Research Letters*, Vol.38, L19307, 2011.
- 6) Suzuki, W., Aoi, S., Sekiguchi, H., and Kunugi, T.: Rupture process of the 2011 Tohoku-oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data, *Geophysical Research Letters*, Vol.38, L00G16, 2011.
- 7) Kurahashi, S., and Irikura, K.: Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp.571-576, 2011.
- 8) 野津厚：2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案，日本地震工学学会論文集 第12巻，第2号，pp.21-40，2012.
- 9) Kubo, H. and Kakehi, Y.: Source process of the 2011 Tohoku earthquake estimated from the joint inversion of teleseismic body waves and geodetic data including seafloor observation data: Source model with enhanced reliability by using objectively determined inversion settings, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.103, No.2B, pp.1195-1220, 2013.
- 10) Ide, S. and Aochi, H.: Historical seismicity and dynamic rupture process of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, pp.1-13, 2013.
- 11) 地震調査研究推進本部：全国1次地下構造モデル，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/
- 12) 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/>

ESTIMATION OF SEISMIC WAVEFORMS IN ENGINEERING BEDROCK
BENEATH SEWER BURIED PIPELINES DAMAGED BY THE 2011 OFF THE
PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Ray TERAJIMA and Gaku SHOJI

Numerous sewer buried pipelines were damaged during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake and the damage mechanism needs to be explained. In order to do that, first, features of seismic waveforms in engineering bedrock beneath sewer buried pipelines were clarified and computed by adapting 3D finite-difference seismic waveform's simulation. After comparing computed waveforms with observed waveforms at 19 sites, seismic waveforms at 7 sites, where sewer pipelines were severely damaged, were computed to clarify the dependency of maximum velocities on the damage ratios.