

三次元地盤震動解析による上水道パイプライン 地震被害スクリーニング手法の基礎検討

藤田 航平¹・市村 強²・風間 基樹³・大野 晋⁴・佐藤 真吾⁵

¹正会員 東京大学 地震研究所/大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail: fujita@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学 地震研究所/大学院工学系研究科社会基盤学専攻

³正会員 東北大学 大学院工学研究科 土木工学専攻

⁴正会員 東北大学 災害科学国際研究所

⁵正会員 株式会社 復建技術コンサルタント

本研究では、三次元動的な非線形有限要素法を用いた地盤震動解析手法による上水道パイプライン地震被害スクリーニング手法の基礎検討を行った。2011年の東北地方太平洋沖地震において上水道パイプラインが被害を受けた切り盛り宅地造成地に開発手法を適用し、パイプライン被害に相関が高いとされる地盤の管軸方向歪を求め、実被害との対応を調べた。その結果、地震動の増幅によりパイプライン被害が起きやすい盛土内であっても、被害が生じる可能性が低い箇所をスクリーニングできる可能性が示され、本手法の基礎的な有効性を確認された。

Key Words: Ground motion analysis, pipeline damage screening, cut-and-fill land, strain response

1. はじめに

液状化や地層の滑動等による永久歪に加え、地震動の局所的な増幅による動的歪が埋設管の地震被害の原因となっていると指摘されている¹⁾。地震時の地盤振動の増幅による歪を任意地点で推定するのは困難であるため、比較的容易に計測できるPGV等の地震動指標と地盤歪や埋設管被害を統計データから結び付ける方法が考案されてきたが、複雑地形や地震動の方向依存性など複雑な実地形における歪の推定精度は十分高いとは言えない²⁾。こういった地震動指標を使った推定方法とは異なるアプローチとして近年、三次元地盤震動解析にて地盤歪を推定する方法が開発されている^{3),4)}。この方法では、ボーリングデータ等をもとに作成した地盤モデルに対して三次元地盤震動解析を適用することで地盤内部の動的な歪を直接に求める。不均質な地盤中の非線形波動伝播を時系列で解くため、入力波の時系列特性や地盤物性・形状といった計測データを反映した歪の推定が可能となると期待される。

切り盛り宅地造成地などには短い空間スケールで地盤特性が急激に変化する領域があり、これらの領域では局所的に大きな歪が生じる可能性がある。実際、2011年の東北地方太平洋沖地震の際には切り盛りからなる宅地造成地において上水道パイプラインの被害が多発した。そこで本研究では、10 mスケールで変動する複雑地形における歪応答を求めることができる有限要素

モデル構築手法と地盤震動解析手法を開発し、東北地方太平洋沖地震において上水道パイプライン被害が顕著に発生した地区に適用する。被害箇所とパイプライン被害に相関が高いとされる地盤の管軸方向歪を比較することで、三次元地盤震動解析によるパイプライン被害のスクリーニングの有効性を示す。

2. 手法

地盤増幅はローカルな地盤形状と、地盤物性の非線形化に強く影響を受けるため、対象領域の形状と非線形物性を反映した解析を行うことが重要である。そこで既往研究³⁾に従い、複雑形状を適切に離散化でき、かつ、表面において応力フリーの境界条件を解析的に満足する非線形有限要素法を用いる。ここでは地盤震動を非線形動弾性体内の波動伝播として考え、Newmark- β 法 ($\beta=1/4$, $\delta=1/2$) を使って時間積分を実施する：

$$\left(\frac{4}{dt^2} \mathbf{M} + \frac{2}{dt} \mathbf{C}^n + \mathbf{K}^n \right) \delta \mathbf{u}^n = \mathbf{F}^n - \mathbf{P}^{n-1} + \mathbf{C}^n \mathbf{v}^{n-1} + \mathbf{M} \left(\mathbf{a}^{n-1} + \frac{4}{dt} \mathbf{v}^{n-1} \right). \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{P}^n, \mathbf{u}^n, \mathbf{v}^n, \mathbf{a}^n$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^n &= \mathbf{P}^{n-1} + \mathbf{K}^n \delta \mathbf{u}^n, \\ \mathbf{u}^n &= \mathbf{u}^{n-1} + \delta \mathbf{u}^n, \\ \mathbf{v}^n &= -\mathbf{v}^{n-1} + \frac{2}{dt} \delta \mathbf{u}^n, \end{aligned}$$

$$\mathbf{a}^n = -\mathbf{a}^{n-1} - \frac{4}{dt}\mathbf{v}^{n-1} + \frac{4}{dt^2}\delta\mathbf{u}^n,$$

で更新する．ここで， $\delta\mathbf{u}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$, $\mathbf{a}$, $\mathbf{F}$ は，各々，変位増分，変位，速度，加速度，外力ベクトルである．また， $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ は，質量，減衰，剛性マトリクスであり， dt , n は時間刻み，タイムステップ数である．なお，Rayleigh 減衰を用い，要素減衰マトリクス $\mathbf{C}_e^n$ は要素質量マトリクス $\mathbf{M}_e$ 及び要素剛性マトリクス $\mathbf{K}_e^n$ を用いて，

$$\mathbf{C}_e^n = \alpha\mathbf{M}_e + \beta\mathbf{K}_e^n, \quad (2)$$

として求める．ここで α と β は最小二乗問題

$$\text{minimize} \left[\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left(h - \left(\frac{\alpha}{4\pi f} + \beta\pi f \right) \right)^2 df \right], \quad (3)$$

を解くことで決定する．ここで， $f_{\max}$, $f_{\min}$, h は解析対象最大周波数，最小周波数，減衰定数である．地盤材料の構成則として，Ramberg-Osgood モデル⁵⁾と Masing 則⁶⁾を組み合わせたものを用いる．有限要素モデルの底面に基盤波を入力し，境界条件として側面及び底面に半無限吸収境界条件を適用する．解析コストが膨大となることから，MPI/OpenMP ベースのハイブリッド並列された三次元非線形動的有限要素法を用いる．

上水道パイプラインネットワークの被害評価には数 km^2 の領域の地盤震動解析を実施する必要がある一方で，一般的な地震動における歪応答の収束を担保するには 1 m オーダーの要素サイズが必要となるため，三次元有限要素モデルは大規模 (10^8 自由度オーダー) となる．そこで本研究では，バックグラウンド格子法ベースの有限要素モデル生成手法⁷⁾を使う．対象領域を囲むバックグラウンド格子を使って格子毎にローカルに要素分割を行うため，複雑形状を高速・ロバストに要素分割できる方法となっている．上記の高速な有限要素解析手法と組み合わせることで，非線形物性・複雑地盤形状を反映した地盤震動解析が可能となる．

3. 地盤震動解析による上水道パイプラインの地震被害のスクリーニング例

東北地方太平洋沖地震時に上水道パイプラインが被害を受けた仙台市内の宅地造成地を対象に，地震時における地盤歪を推定し，被害との関連性を分析する．地盤の物性は⁸⁾を参考にして表-1のように定めた．切土・盛土境界が 10 m スケールで変化する複雑形状をしており，物性に強いコントラストがあるため，局所的に大きな地盤歪が生じ埋設パイプラインが被害を受けやすい領域となっている．図-1に対象領域の三次元有限要素モデルを示す．側面からの反射波を防ぐために領域の四方に 150 m のバッファ領域を設け，対象領域を含む $1,320 \text{ m} \times 1,620 \text{ m}$ (EW $\times$ NS) の領域において，複雑地形を反映するために 2.5 m の四面体二次要素でモ

表-1 三次元地盤構造モデルの物性値

	V_p m/s	V_s m/s	ρ kg/m^3	$h_{\max}$	γ_r
盛土	700	100	1,700	0.25	0.007
切土	1,450	300	1,900	0.20	0.08
基盤層	1,450	700	2,000	—	—

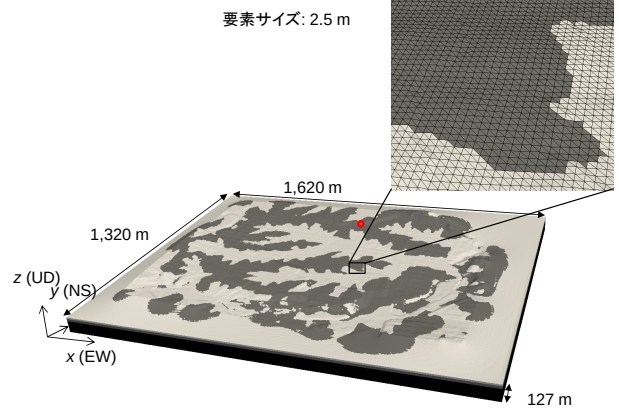


図-1 対象地盤の有限要素モデル．灰色部分は切土，白色部分は盛り土を示す．赤丸は観測点 SAKR の位置を示す．

デルを作成している．深さ方向は標高-127 m までモデル化しており，モデル全体で自由度は 85,143,240，要素数は 20,666,257，節点数は 28,381,080 となっている．以上の地盤構造モデルに対して，対象領域内において観測された地震波形 (Small Titan の S14 SAKR⁹⁾) を工学的基盤に引き戻して入力した．レイリー減衰の設定には， $f_{\max} = 2.5 \text{ Hz}$, $f_{\min} = 0.1 \text{ Hz}$ を用いた． $dt = 0.001 \text{ s} \times 300,000$ 時間ステップの解析には京コンピュータ 512 ノードを使って 46,993 s (13 h 03 min) 要した．

地表面から深さ 1.2 m に埋設されているパイプラインは付近の地盤の動きに応じて変形するため，まず，地表面における地震応答を分析する．図-2に地表面における最大変位応答と，最大主歪応答分布を示す．最大変位は切土部分では小さく，盛土が深くなるにつれて大きくなっており，一次元的な地盤構造から類推される応答分布と整合していることが分かる．その一方で，最大主歪は切土と盛土の境界から，少し盛土側に入ったところで大きくなっており，図-2bの1の箇所のように断面がV字状となる谷においては上から見て二本の筋状に歪が大きくなる分布となっている．1978年の宮城県沖地震の際，軟弱・硬質地盤間の層境界がV字形状となる箇所において同様の歪分布が観測されており¹⁰⁾，また，既往研究の三次元地盤解析³⁾でも類似の分布が計算されている等，V字谷での歪応答分布は既往研究と整合した結果となっている．一方で，図-2bの2の箇所のように谷が上から見てY字に交わるような枝谷接合部においては歪が複雑に分布していることがわかる．

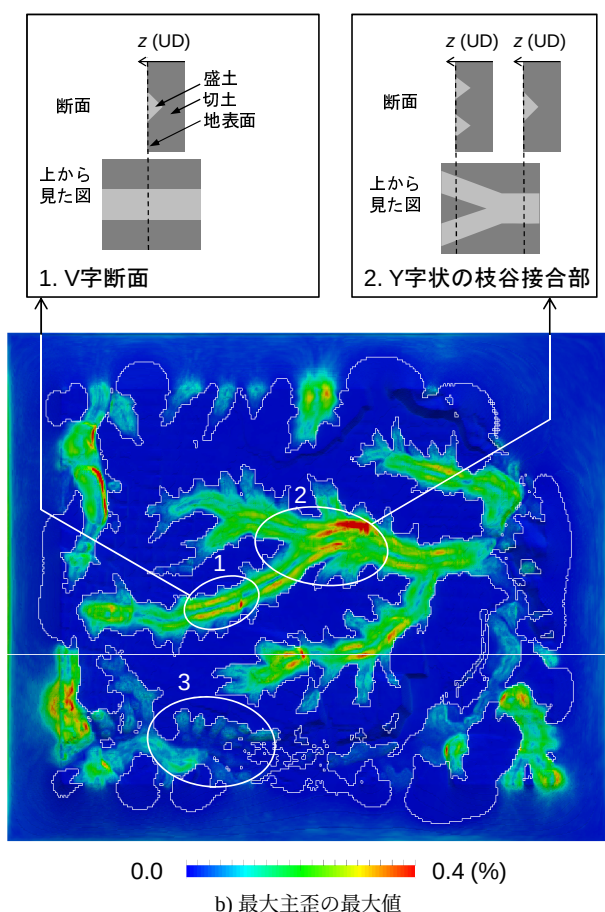
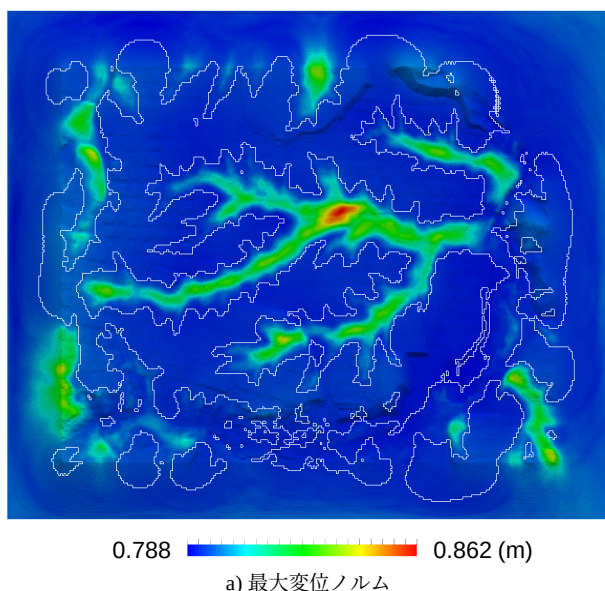


図-2 地表面における最大変位、及び、最大主歪の最大値の分布。白線は切土と盛土の境界を示す。

このような複雑な三次元形状を持つ領域における歪の分布は簡易な解析手法で予測することは難しく、三次元地盤震動解析によって初めて分布や大きさが評価できるものである。結果として、この付近において最大の歪応答が生じていることがわかる。また、図-2bの3

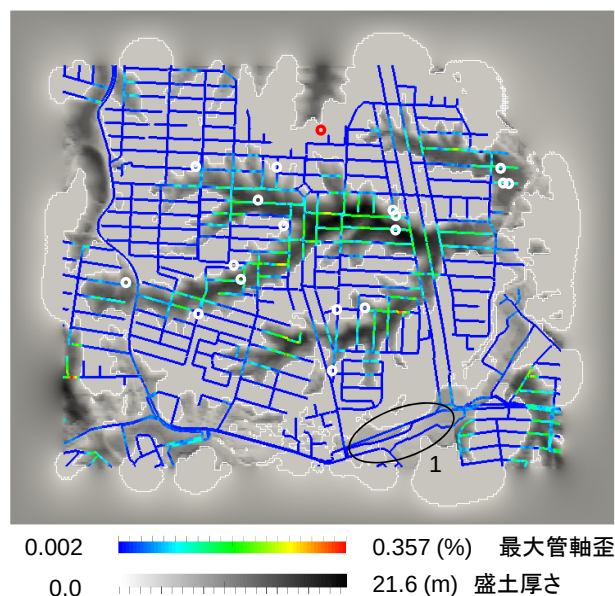


図-3 最大管軸歪の分布。白線は切土と盛土の境界を示す。白丸は管路被害が生じた地点を示す。赤丸は観測点 SAKR の位置を示す。

のように盛土においても歪応答が小さい箇所もあるように、歪応答は盛土内で一様に大きいわけではなく、盛土の広さや厚さなどの三次元形状に応じて変化していることがわかる。

東北地方太平洋沖地震時に生じた対象領域内 17 か所の管路被害のうち、12 か所は継ぎ手の離脱によるため、継ぎ手離脱に相関があると言われている管軸方向の引張歪を分析する。図-3に、パイプラインの埋設位置における管軸方向の引張歪を示す。図-2bと比較すると、管軸引張歪は地表面における主歪とほぼ同じ分布となっており、地表面の歪分布が埋設パイプライン地点の歪の近似となっていることが分かる。上水道パイプラインの設計許容歪は0.004程度¹¹⁾であるのに対して、計算における管軸引張歪の最大値が0.00357となっており、経年劣化等を考えると十分に被害が起こりうるオーダーの歪が生じていることがわかる。図-3の管軸引張歪と実際の被害箇所を比べると、歪が最大となる箇所は被害箇所と必ずしも一致していないが、地盤歪が小さいと計算された切土領域においては被害が生じていないことがわかる。また、一見、盛土全体で均一に被害が生じているように見えるが、実際には盛土内でも歪が小さい箇所においては被害は生じていないことがわかる(例えば、図-3の1の領域など)。このように、地盤データの不確実性などのために被害箇所と計算歪が最大となる箇所は一致しないが、地盤形状や入力波形等のチューニングをせずとも三次元地盤震動解析により被害箇所の絞り込みが可能となると期待できる。

4. おわりに

本研究では、三次元動的非線形有限要素法を用いた地盤震動解析手法による上水道パイプライン地震被害スクリーニング手法の基礎検討を行った。ここでは、地盤形状と非線形物性を反映できる非構造格子有限要素法を使って、東北地方太平洋沖地震時における数キロ四方の領域の時系列歪応答解析を行った。V字谷では類似地形で過去に観測された歪と整合しつつ、谷が上から見てY字に交わるような枝谷接合部など三次元的な地形では複雑な歪分布を得られた。継ぎ手離脱被害に相関がある管軸方向歪の分布は被害分布と完全には一致しないものの、歪が小さいと評価された個所では被害が一件も確認されていないなど、三次元地盤振動解析を使うことで被害が生じる可能性が低い箇所をスクリーニングできる可能性が示され、本手法の基礎的な有効性が確認できた。このように三次元解析による歪推定は観測や地震動指標による歪推定を補完する役割を担うことができると考えられ、計算の高速化と計算機の低価格化とあわせることで実務への適用が期待される。

謝辞: 本研究では復建技術コンサルタントの地盤データ、東北工業大学のSmall-Titanにおける観測地震波形、仙台市水道局の上水道被害情報を利用した。また、本研究では理化学研究所計算科学研究機構の京コンピュータを利用した(hp160221, hp160160, hp160157, hp170249)。また、本研究は日本学術振興会の助成を受けている(15K18110, 26249066, 25220908, 17K14719)。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Liang, J. and Sun S., 2000, "Site Effects on Seismic Behavior of Pipelines: A Review," J. Pressure Vessel Technol., **122**, pp. 469–475.

- 2) Pineda-Porras, O. and Najafi, M., 2010, "Seismic Damage Estimation for Buried Pipelines: Challenges after Three Decades of Progress," Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, **1**:1, pp. 19–24.
- 3) Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Takashi Sakanoue, Ryo Hamanaka, Three-dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, *Journal of Pressure Vessel Technology*, American Society of Mechanical Engineers, **136**, Paper No: PVT-13-1131, 2014, DOI: 10.1115/1.4026208.
- 4) Ichimura T, Fujita K, Errol Quinay P, et al. Comprehensive Seismic Response Analysis for Estimating the Seismic Behavior of Buried Pipelines Enhanced by Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Ground Motion and Soil Amplification. ASME. J. Pressure Vessel Technol. 2016;138(5):051801-051801-8. doi:10.1115/1.4033250.
- 5) Idriss, I.M., Singh, R.D. and Dobry, R., 1978, "Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading," Journal of the Geotechnical Engineering Division, **104**, pp. 1427–1447.
- 6) Masing, G., 1926, "Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing," *Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics*, pp. 332–335 (in German).
- 7) Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., 2009, "A Hybrid Multiresolution Meshing Technique for Finite Element Three-Dimensional Earthquake Ground Motion Modeling in Basins Including Topography," *Geophysical Journal International*, **177**, pp. 1221–1232.
- 8) Working group of central disaster management council in Japan for Tokai earthquake, Cabinet Office, Government Of Japan, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/index.html> (in Japanese).
- 9) Makoto Kamiyama, Tadashi Matsukawa, Masahiro Anazawa, 2011, Strong-Motion Records Obtained by Small-Titan of Tohoku Institute of Technology During the 2011 Great East Japan Earthquake, "Strong-motion records during 3.11Earthq_Eng.pdf" accessible from <http://smweb.tohtech.ac.jp/smalltitan/english/index.html>
- 10) Tsukamoto, K., Nishio, N., Satake, M., and Asano, T., 1984, "Observation of Pipeline Behavior at Geographically Complex Site During Earthquake," 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, **7**, pp. 247–254.
- 11) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解析, 2009.

(2017. 9. 1 受付)

Development of screening method of seismic damage of water-distribution pipelines with three-dimensional ground motion analysis

Kohei FUJITA, Tsuyoshi ICHIMURA, Motoki KAZAMA,
Susumu OHNO and Shingo SATO

We developed a method for screening for possible areas of seismic damage to buried water-distribution pipeline networks. Here we use a ground motion analysis method with three-dimensional nonlinear dynamic finite-element method. The method is applied to a cut-and-fill developed area in Japan, whose water-distribution pipeline network was severely damaged in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. The obtained strain distribution is compared with known points of pipeline damage to check the validity of the method. From the results, it is expected that the developed method could be used to screen for possible damage to buried pipelines in a given area.