

ガスパイプラインの耐震性検討を目的とした 3次元非線形動的有限要素法による地盤震動解析

Seismic Amplification Analysis by the Three-dimensional Non-linear Dynamic Finite Element Method
for estimating Earthquake-resistance of Gas Pipelines

東京大学 工学部 社会基盤学科 学生会員 ○吉行 淳
理化学研究所 計算科学研究機構 正会員 藤田 航平
東京大学准教授 工学部 社会基盤学科 正会員 市村 強
東京ガス 正会員 坂上 貴士
東京大学教授 工学部 社会基盤学科 正会員 堀 宗朗

1. はじめに

宅地造成地等の切り盛り地盤では、地震動が地盤の物性のコントラストにより増幅されるため、ガスパイプラインの耐震性への影響が懸念されている。従来のガスパイプライン設計で用いられてきた簡便なひずみ推定手法は、ひずみが本来発生しないはずの水平成層地盤においてひずみが発生するようになっている上に、地盤構造の3次元性に依存する局所的な増幅の影響が考慮されていないといった問題点が指摘されている。従前の十分なレベルにある耐震性をさらに向上させ、万全の震災対策を行うためにも、精度の高いひずみ推定手法が望まれる。本研究では、3次元地盤構造による局所的な地盤増幅を評価するための3次元非線形有限要素法を用いたひずみ推定手法を構築し、実務へ展開させることを目指す。本研究では、ROモデル・MASING則を構成則として用いて、地震動の集中が懸念される実サイトの3次元地盤震動解析を行い、地表面に生じる変位、ひずみを評価する

2. 手法

3次元地盤震動解析を行うにあたり、参考文献1)で提案されている非線形動的有限要素法コードを用いる。このコードでは、非線形波動方程式を離散化して導かれる次の線形化された線形マトリクス方程式を解く。

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

ここで、 δu , u , v , a , F , Q はそれぞれ変位増分、変位、速度、加速度、物体力、外力の節点ベクトルである。 M は

Key Words : ガスパイプライン, ひずみ推定, 3次元広域地盤震動解析, 非線形有限要素法

〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

E-mail: y-atsu@eri.u-tokyo.ac.jp Tel: 080-3571-9169

質量マトリクス、 C は減衰マトリクス、 K は剛性マトリクス、 dt は時間増分、そして n は時間ステップである。

本研究で扱う広域の地盤震動解析では、解析対象領域が数km四方、分解能が1mオーダーとなるため、先述の3次元線形マトリクス方程式は数千万自由度以上となり、その計算コストの軽減が必須となる。参考文献1)では、計算コスト軽減の工夫としてマルチグリッド法、精度混合演算、可変的前処理付き共役勾配法、Element-by-Element法などのアルゴリズムが導入されており、大規模な解析を高速に行うことを可能としている。また、解析モデルの側面と底面には、入力地震動を設定する他、半無限吸収境界条件も適用している。地盤の非線形構成則としては修正ROモデルとMASING則を用いている。なお、計算の高速化がなされているとはいえ、通常の有限要素法であるため、組み込まれている構成則を他の地盤の構成則に入れ替えることは容易である。

3. ROモデル・MASING則を用いた実サイトにおける3次元地盤震動解析

ガスパイプラインが数多く埋設されている関東地方のある宅地造成地では、宅地造成の影響により、堆積層である軟弱層と基盤層が複雑に入りこんだ地形となっており、地震動の局所的な増幅が懸念されている。本研究では、3次元広域地盤震動解析を行い、地表面の変位とひずみを評価した。作成した3次元有限要素地盤モデルの大きさは、 $0 \leq x \leq 3584\text{m}$, $0 \leq y \leq 2976\text{m}$, $0 \leq z \leq \text{約 } 160\text{m}$ である。各層の物性値は表-1の通りで

ある。参考文献1)を参考に、対象とする地震波の最小周波数を0.1Hz、最大周波数を2.5Hzとしており、その結果、生成した3次元有限要素地盤モデルでは、堆積層の要素サイズの最大値が4m、基盤層の要素サイズの最大値が32mとなった。対象モデルの自由度は75374208となり、節点数、四面体二次要素数はそれぞれ25152755、17741950となった。モデルの全体像を図-1に示す(青が基盤層、赤が堆積層を表している)。

以上に示した解析モデルに対して、神戸波を入力し、3次元非線形動的有限要素法により、0.005秒刻みで65536ステップの地盤増幅計算を行い、地表面上の各節点の変位を0.01秒刻みで出力した。解析には、東京大学のOakleaf-FXを用い、OpenMPとMPIを組み合わせたハイブリッド並列化を行って計算した。1ノードあたり8コアの計算ノードを240ノード用いて計算を行ったところ、計算時間は、11時間7分45秒であった。最大地表面変位と最大地表面主ひずみの解析結果を図-2、図-3に示す。

図-2として示した地表面の変位分布より、地表面が堆積層である箇所において大きな変位が発生していることが容易に見て取れる。地表面における変位の大きさは概ね堆積層厚との相関が高いことが示され、既往研究との親和性は高い。

図-3として示した地表面のひずみ分布からは、堆積層と基盤層の層境において大きなひずみが生じていることが分かる。同じような層境であっても、生じているひずみの大きさは場所によって異なる。また、堆積層深度の空間変化率などといった単純な地盤構造の指標だけに依存しているわけでもなく、3次元的な地盤の構造に強く依存していることが示され、3次元解析の有効性が強く示唆される結果となった。

4. おわりに

本研究では、3次元非線形動的有限要素法を用いて、ガスパイプラインの耐震性評価を念頭に、実在の宅地造成地における3次元地盤震動解析を行った。地盤ひずみ分布は、地盤構造の3次元性に強く依存しており、堆積層と基盤層の層境において、複雑かつ優位に大きくなることが確認できた。今後は、構成則を、修正ROモデル・MASING則から3次元弾塑性構成則に入れ替え、永久変形等を考慮した3次元広域地盤震動解析の実現を目指す。

layer	V_p [m/s]	V_s [m/s]	ρ [kg/m ³]	h	γ
1st layer	400	100	1600	0.14	0.019
bedrock	2000	500	2000	0.01	10.0

表-1 対象地盤の物性値

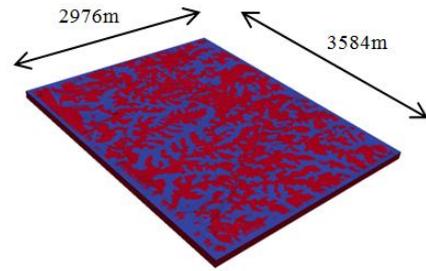


図-1 対象モデルの概観

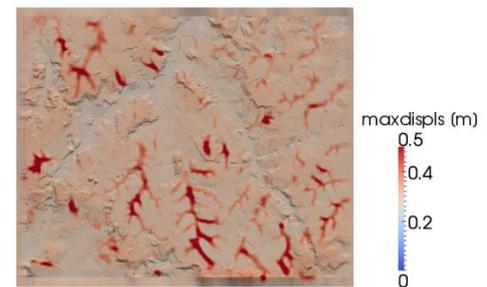


図-2 最大地表面変位

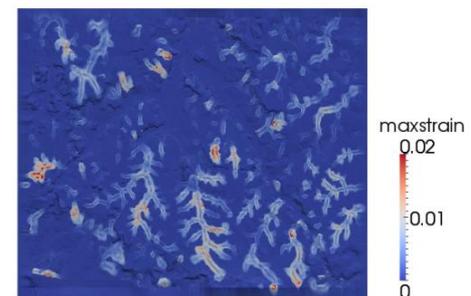


図-3 最大地表面主ひずみ

参考文献

- 1) Ichimura, T., Fujita, K., Hori, M., Sakanoue, T., Hamanaka, R.: Three-Dimensional Nonlinear Seismic Ground Response Analysis of Local Site Effects for Estimating Seismic Behavior of Buried Pipelines, ASME Journal of Pressure Vessel Technology. Vol. 136, August 2014
- 2) Advisory Committee for Natural Resources and Energy, Urban Area Thermal Energy Committee, Gas Safety Subcommittee, Working Group for Earthquake Disaster Prevention, Report on Disaster Mitigation for Gas Supply in View of Great East Japan Earthquake, 2012 (in Japanese)