

大規模配管ネットワークの耐震診断のための高速解析技術

Fast Simulation Method for Seismic Diagnosis of Extensive Distribution Networks

鈴木 信久 SUZUKI Nobuhisa JFE 技研 主席研究員 (部長)
中島 良和 NAKAJIMA Yoshikazu JFE エンジニアリング 水道技術部 総括室長
網沢 洋二 TSUNASAWA Youji JFE エンジニアリング ガス技術部 設計室長

要旨

最新の高速応答解析手法「NeEX」により、敷設線形が複雑な埋設配管ネットワークの非線形地震応答を、短時間で解析することが可能になった。NeEXは、埋設配管ネットワークをセグメント要素で離散化する、新しい非線形応答解析手法である。NeEXはネットワークをセグメント要素で離散化するため、FEA（有限要素解析）よりも少ない要素数でネットワークをモデル化することができる。NeEXの解析精度はFEAに対して数%の誤差であり、計算時間はFEAの1/5000～1/10000である。NeEXの高精度で高速な解析性能により、大規模な埋設配管ネットワークの耐震診断が可能になった。

Abstract:

A newly developed simulation program, NeEX, can quickly predict nonlinear seismic responses of buried distribution networks for gas and water supply systems. NeEX is equipped with swift algorithm to simulate the seismic responses of the networks, where the networks should be idealized with segments. The number of the segments is remarkably less than finite elements. NeEX provides sufficient accuracy the same as finite element analysis (FEA) and a swift computing capability faster than FEA by 5000 to 10000 times. NeEX will be able to deal with seismic diagnosis of the extensive buried distribution networks for the gas and water supply systems.

1. 緒言

パイプで都市ガスや飲料水を供給するネットワークシステムは、広範な供給区域に網目状に張り巡らされている。供給ネットワークは、道路のネットワークと同様に展開している。供給ネットワークが広範に展開しており、形状が複雑であるため、地震応答をFEM（有限要素法）で解析することは不可能と考えられていた¹⁾。

JFEグループは、この課題を解決するために、大規模供給ネットワークの地震応答を高速で解析するプログラムNeEX (Network EXpress) を開発した^{2~4)}。NeEXは、ネットワークをセグメントに分割し、セグメントの変形を個別に解析する方法を採用している。セグメントはネットワークの直線区間（直管要素）および直線区間の両端に接続する二つの異形管（境界要素）で構成されている。

NeEXの解析精度はFEA（有限要素解析）と同等であり、計算速度はFEAの5000～10000倍高速である。したがって、FEAの解析精度を維持しながら、ネットワークを構成する多数のセグメントの変形計算を迅速に行うことができるようになり、ネットワークの耐震診断や安全性照査を短時間で実施することが可能になった。

2. ネットワークのモデル化

2.1 ネットワークの概要

一般的な埋設配管ネットワークの一部分をFig. 1に示す。図に示すように、ネットワークは直管、バンド管および分岐管などの異形管が接続して構成されている。図では、ネットワークに沿って地震動が伝播しており、ネットワークの各部分に変形している状況を示している。地震動によるネットワークの変形は、直管部分では軸変形が卓越し、異



Fig.1 A part of a distribution network

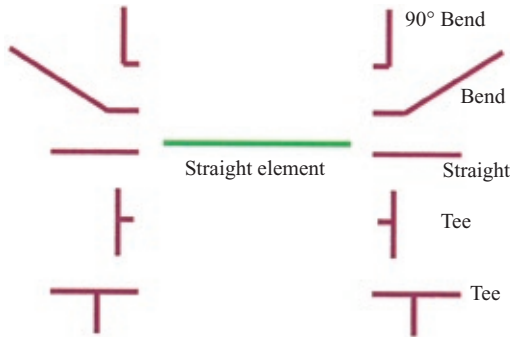


Fig. 2 Definition of segments to idealize distribution network

形管部分では曲げ変形が卓越する。

2.2 セグメントの定義

Fig. 1 に示すネットワークを離散化するために、Fig. 2 に示すセグメントを定義する。Fig. 2 に示すセグメントの中央には直管要素があり、直管要素の両端には、図に描かれている境界要素を左右一つずつ接続することができる。直管要素の左右に接続する境界要素は、任意の組み合わせが可能である。

Fig. 1 のネットワークは、Fig. 2 に示すセグメントによって離散化することができる。セグメント数は直管要素数と同数であり、境界要素は、隣接する直管要素に重複して定義される。

3. セグメントの変形解析

3.1 解析の前提条件

セグメントの変形を解析するにあたり、以下の前提条件を設定した。

(1) パイプの応力歪曲線

パイプの応力歪曲線は、round-house 型とし、次式のように Ramberg-Osgood 式⁵⁾で表す。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\alpha\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^N \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 E : ヤング率、 σ_0 : 降伏応力 (API 材の場合は 0.5% 歪に相当する応力)、 α, N : 材料の歪硬化特性によって決定される Ramberg-Osgood の定数。

(2) 地盤のばね特性

(a) パイプ管軸方向への地盤のばね特性は摩擦力のみを考慮し、剛塑性モデルとする。

(b) 管軸直角方向への地盤ばね特性は弾完全塑性のバイリニアモデルとする。

(3) 地盤の動的変位

地盤の動的変位分布は、高圧ガス導管耐震設計指針・改訂版 (2000)⁶⁾ に採用されている表面波の P 波

成分とし、波動の進行方向はパイプの軸方向とする。

3.2 解析モデル

Fig. 3 に示すように、両端の境界要素に 90° ベンド (曲げ角度 90° のベンド管) を持つセグメントを解析モデルの例とする。

Fig. 3 の上段の図は、セグメントの基本構成と地盤変位分布の関係を示したものである。Fig. 3 の中段の図は、両端のベンドおよびベンド管に接続する直管を境界要素として、単一の非線形スプリングでモデル化したものである。さらに Fig. 3 の下段の図は、前項に示した前提条件のように、管軸方向の地盤ばね特性を剛塑性モデルとしたために、パイプには一定の摩擦力が作用することを表現したものである。

3.3 セグメントの変形解析

Fig. 3 に示すセグメントの変形を表すに際し、未知変数は右側境界要素の変位 δ_{BR} および左側境界要素の変位 δ_{BL} の二つである。境界要素から直管要素に作用する外力である F_{BR} と F_{BL} は、後述のように、それぞれ δ_{BR} と δ_{BL} の従属変数である。

直管要素の軸変形を求め、左右の境界要素との適合条件と平衡条件を満足させると、 δ_{BR} は (2) 式のように求められる。(2) 式の未知数は δ_{BR} と K_{BR} であるが、 K_{BR} は Fig. 4 に示すように δ_{BR} の関数であるため、(2) 式は δ_{BR} に関する非線形方程式として解くことができる。

$$\delta_{BR} = \frac{1}{EA + K_{BR}L_R} \left[EAu_g(L_R) - \frac{f_t}{2}L_R^2 - \frac{\alpha\{f_tL_R + K_{BR}\delta_{BR}\}^{N+1} - (K_{BR}\delta_{BR})^{N+1}}{(N+1)f_t(A\sigma_0)^{N-1}} \right] \dots\dots (2)$$

ここに、 K_{BR} は Fig. 4 に示す境界要素の変形特性を表す非線形ばね係数で、非線形地盤反力特性とパイプの非線形

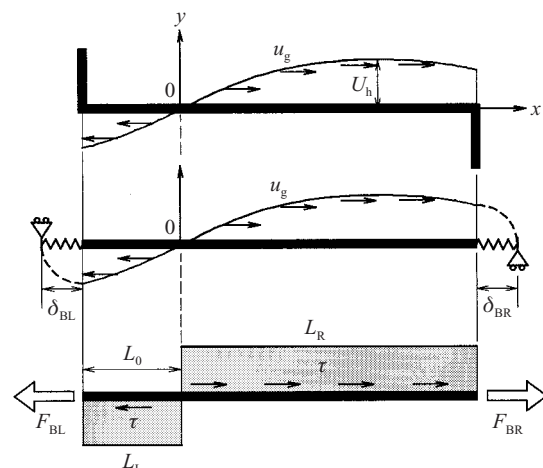


Fig. 3 Analytical model of a segment

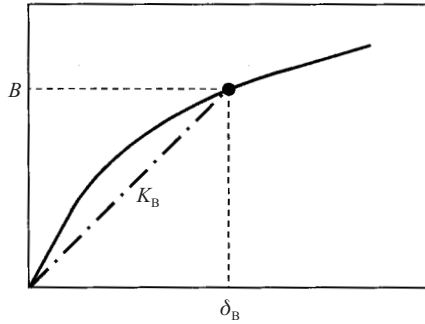


Fig. 4 Force-displacement relation of a boundary element

変形特性を合成したものである。

さらに、左側の境界要素についても同様な計算を行い、境界要素の変位 δ_{BL} について、次の非線形方程式が求められる。

$$\delta_{BL} = \frac{1}{EA + K_{BL}L_0} \left[-EAu_g(L_L) - \frac{f_r}{2}L_L^2 - \frac{\alpha \{ (f_r L_0 + K_{BL}\delta_{BL})^{N+1} - (K_{BL}\delta_{BL})^{N+1} \}}{(N+1)f_r(A\sigma_0)^{N-1}} \right] \dots\dots (3)$$

ここに、 K_{BL} は Fig. 4 に示す境界要素の変形特性を表す非線形ばね係数で、非線形地盤反力特性とパイプの非線形変形特性を合成したものである。

3.4 NeEX の特徴

3.3 節に示したように、中央の直管要素の変形について、境界要素の変位を未知数とする非線形解が (2)、(3) 式のように求められた。この非線形解は複雑な式であるが、数回の繰り返し計算で収束解が得られる^{2~4)}。

Fig. 4 に示す境界要素の変形特性は、FEA によって軸力と変位の関係を求めておき、データベースを作成しておく。どんなに大きなネットワークでも、境界要素の種類は Fig. 2 に示す程度である。また、管径のパラメータについても、多くても 10 種類程度である。

ネットワークの変形計算において、境界要素の変形特性に関するデータベースを保有することにより、計算の重複を避けて計算時間を短縮化することができる。この点が NeEX によるネットワーク変形解析の特徴であり、大規模ネットワークの耐震診断における最大のメリットである。

4. NeEX の計算精度と計算速度

4.1 計算モデル

NeEX の計算精度と計算速度を調べるため、Fig. 5 に示すモデルネットワークを作成した。モデルネットワークを構成するパイプは呼び径が 150 mm と 200 mm で、直管の基本長さを 100 m とした。また、モデルネットワークの左

側から右側に波動が進行する場合を想定し、波長が 200 m の場合について示している。

モデルネットワークの左側から右側に波動が進行する場合、モデルネットワークは赤、青、緑で表した 3 つのセグメントでモデル化することができる。Segment ①の境界要素はバンドで、Segment ②の境界要素は分岐管である。

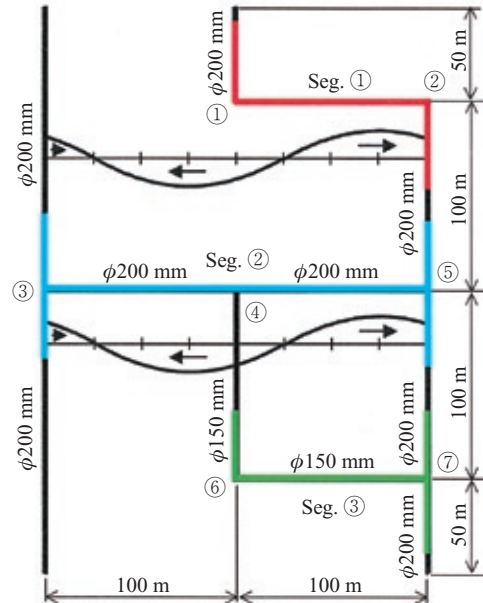


Fig. 5 Distribution network model for verification of NeEX

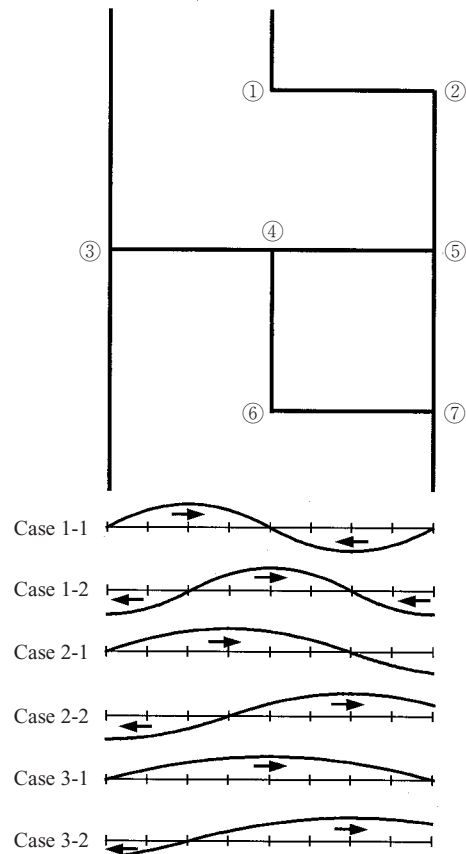


Fig. 6 Node definition of the network model and seismic waves considered for the analysis

Segment ③の境界要素はバンドと分岐管である。

また、入力地盤変位の波長を 200 m, 300 m, 400 m の 3 種類とし、計算条件に対応するモデルネットワークとの位置関係を Fig. 6 に示す。

4.2 計算の前提条件

モデルネットワークの変形計算の前提条件として、材料の応力歪曲線を Fig. 7 のように設定し、地盤のばね特性を高圧ガス耐震 (2000) に基づいて Fig. 8 のように設定した。また、直管両端に位置する境界要素の非線形反力特性は、Fig. 7 および 8 の前提条件に基づいて、FEA で Fig. 9 のよ

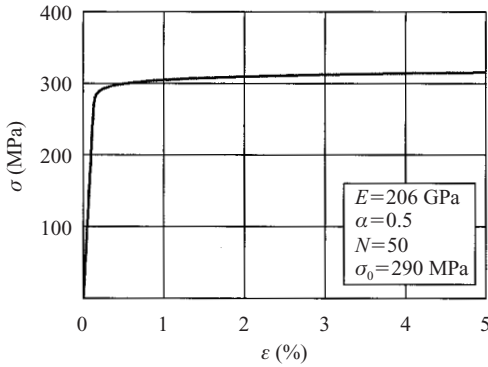


Fig. 7 Stress strain relationship of pipes

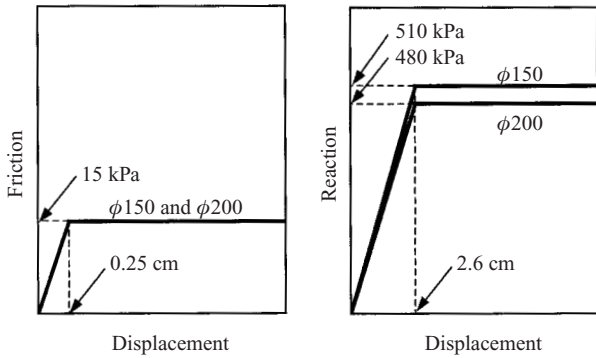


Fig. 8 Soil springs for 150 mm and 200 mm diameter pipes

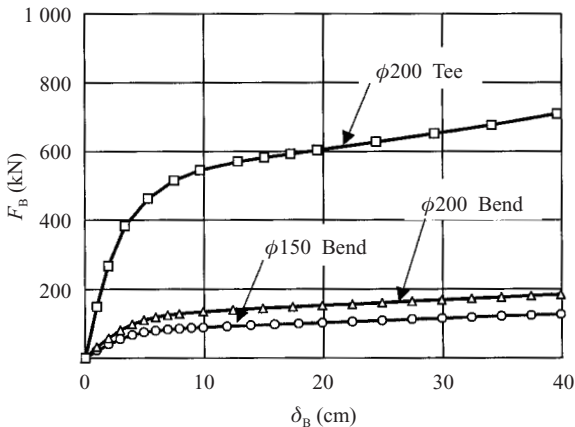


Fig. 9 Load displacement relationship of boundary elements

うに得られた。

4.3 計算精度

Case 1~Case 3 の計算結果を Table 1~3 に示す。計算結果として表に示してあるのは、直管の両端における変位であり、表中の番号は Fig. 5 および 6 の節点番号である。NeEX と FEA の計算誤差は FEA と NeEX の差を FEA で除した絶対値を示してある。

各計算結果とも NeEX による計算結果は FEA の解と良好に一致しており、誤差は 0.1~11.1% である。これらのうち、11.1% の誤差は Case 2-2 の⑤で発生しているが、計算誤差が 0.1 cm と小さいことから、計算結果としては十分な精度と考えられる。この他に、計算誤差が 5~7% の計算例

Table 1 Examples with 200 m wave length

	Case 1-1			Case 1-2		
	δ_B (cm)		Error (%)	δ_B (cm)		Error (%)
	NeEX	FEA		NeEX	FEA	
①	-10.42	-10.55	1.2	-17.59	-17.60	0.1
②	10.41	10.52	1.0	-17.59	-17.60	0.1
③	2.57	2.49	3.2	8.21	8.75	6.1
⑤	2.57	2.49	3.2	-8.21	8.74	6.1
⑥	-7.56	-7.94	4.8	-25.94	-25.47	1.8
⑦	5.99	5.60	7.0	-6.60	-6.96	5.2

Table 2 Examples with 300 m wave length

	Case 2-1			Case 2-2		
	δ_B (cm)		Error (%)	δ_B (cm)		Error (%)
	NeEX	FEA		NeEX	FEA	
①	-14.91	-14.92	0.1	5.56	5.54	0.4
②	-14.91	-14.92	0.1	-5.54	-5.55	0.2
③	5.28	5.41	2.4	12.26	12.27	0.1
⑤	-15.06	-14.80	1.8	-0.80	-0.90	11.1
⑥	-20.10	-20.04	0.3	4.76	4.74	0.4
⑦	-7.06	-7.02	0.6	3.09	-3.07	0.5

Table 3 Examples with 400 m wave length

	Case 3-1			Case 3-2		
	δ_B (cm)		Error (%)	δ_B (cm)		Error (%)
	NeEX	FEA		NeEX	FEA	
①	-3.96	-3.97	0.3	11.40	11.41	0.1
②	-11.40	-11.49	0.8	3.98	4.00	0.5
③	7.51	7.89	4.8	5.98	5.94	0.7
⑤	-7.51	-7.88	4.7	5.98	5.94	0.7
⑥	-6.04	-6.03	0.2	12.11	12.09	0.2
⑦	-6.71	-6.54	2.6	1.63	1.64	0.1

が見られるが、これらについても計算誤差は 0.3 cm 程度と小さいことを考慮すれば、実用的には十分な解析精度である。

4.4 計算速度

Fig. 1 のネットワークに関する計算の他に、さらに大規模なネットワークについて計算を行い、計算時間を比較した。FEA にはスーパーコンピュータを使用し、NeEX による解析ではパーソナルコンピュータを使用した。その結果、NeEX による解析では FEA の 1/5 000~1/10 000 の計算時間で計算結果が得られた。

また、3 km 四方の区域におけるネットワークの応答を NeEX で計算したところ、計算時間は約 1 分であった。同じネットワークの応答を FEA で大型計算機を使って計算する場合、5 000~10 000 分かかることになる。これは、コンピュータを 24 時間稼動しても 3.5~6.9 日もかかることになる。

5. 結言

埋設配管ネットワークの非線形地震応答を、効率良く計算する NeEX の概要を示した。NeEX の基本性能および特徴を以下にまとめる。

- (1) 境界要素の変形特性は、FEA の結果をデータベース化しているため、FEA の精度が保証されている。このため、計算精度を低下させることなく、計算の高速化が可能である。

- (2) 境界要素として任意角度の曲管、分岐管、クランク、ループ、自由端などを考慮することができ、大規模なネットワークの耐震設計、耐震診断、耐震性照査を短時間でこなうことが可能である。

参考文献

- 1) 日本ガス協会, 一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針, 1982.
- 2) 鈴木信久, 堀川浩之, 森健, 真弓敏行, 埋設導管ネットワークの地震応答高速解析法, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, 2002.
- 3) 鈴木信久, 真弓敏行, 細川直行, 埋設ガス導管ネットワークの高速耐震診断プログラム「NeEX」, 都市ガスシンポジウム, 2005.
- 4) Suzuki, N.; Hasegawa, N.; Yabuguchi, T. Seismic diagnosis of extensive water distribution networks. 4th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Water Supply System. 2005.
- 5) Ramberg, W.; Osgood, W.R. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA. TN.902, 1943.
- 6) 日本ガス協会, 高圧ガス導管耐震設計指針, 2000.



鈴木 信久



中島 良和



網沢 洋二