

地震時の管路系流体過渡解析

三橋 利玄* 浜野 明千宏*

Fluid Transient Analysis of Piping System When the Earthquake Acceleration is Imposed

Toshiharu Mitsuhashi* and Achihiro Hamano*

わが国は有数の地震多発国であり、管路系を有する各種プラントやライフラインでは、常に地震の脅威にさらされている。そこで、地震時の管路系内の流体過渡挙動に着目して、管路系液体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Ω に、地震加速度による加振機能を組み込んだ。次に、いくつかの計算事例を実施し、組み込んだ計算機能の確認を行った。

本編では、Advance/FrontNet/Ω に組み込んだ地震加速度による加振機能および計算事例について紹介する。

Key word: 地震加速度、管路系、一次元流体過渡解析、水撃、液柱分離

1. はじめに

わが国は有数の地震多発国であり、管路系を有する発電プラントや化学プラントなどの各種プラント、および管路網のライフラインでは、常に地震の脅威にさらされている。

流体解析の分野では、液体タンクなどに地震加速度が加わった時に生じる液体のスロッシング挙動の解析が広く行われてきた。建築物の耐震設計と同様に構造物としての管路系の耐震設計を行う上で、地震応答解析がよく行われているが、管路系内の流体過渡挙動に着目した解析は、それほど行われていないようである。

東日本大震災のような最大級の地震が生じた場合は別としても、震度 4 や 5 程度でも各種プラントの冷却系配管や反応液の流送配管内の液体の流体に、地震加速度が加えられた時、流量が大きく変動したり停止したりすると、冷却機能が損なわれたり、異常な反応状態が生じたりして事故が生じる可能性がある。また、そのような事故に至らなくても、管路内で発生した水撃によって、

ポンプやバルブ等の流体機器に損傷を与えることも考えられる。

そこで、液体管路系に地震加速度で加振された時における管路系内の流況や水撃圧が計算できるようにするために、当社で開発した管路系液体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Ω に、地震加速度による加振機能および高速 Fourier 変換(FFT)によるパワースペクトル密度(PSD)計算機能を組み込んだ。

次に、組み込んだ計算機能の妥当性を確認するために、通常運転時の水平配管系に地震加速度を加えた場合、およびポンプトリップ時と同時に地震が生じた場合の解析を実施した。

本編では、Advance/FrontNet/Ω に組み込んだ地震加速度の加振に関する計算機能および上記 2 ケースの計算事例について紹介する。

2. 地震加速度の加振計算機能の組み込み

当社では、汎用的な管路系液体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Ω を開発・整備してきた。このたび、地震によって管内流体に加わる加速度を加味する機能を Advance/FrontNet/Ω に追加した。Advance/FrontNet/Ω の機能一覧を表 1

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2nd Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

に示す。運動量保存式と質量保存式を基礎方程式とし、水撃解析で実績のある特性曲線法を用いて流体過渡計算を行う。

表 1 Advance/FrontNet/Ω 機能一覧

項目	入力詳細
液体（水、LNG、エタノール、液体窒素など）	密度、粘性、体積弾性率、飽和蒸気圧
直管、テーパ管	配管長、配管径、管厚、管芯高、ヤング率、粗度
境界条件（圧力指定または流量指定）	固定値または時系列情報を入力
接続、分岐、合流（I字、T字、Y字型）	抵抗の設定可能
複数分岐、複数合流部（+字など）	抵抗設定は不可能
ベンドやオリフィスなどの局所抵抗	抵抗係数
バルブ	開度と Cv 値の関係、開度、遮断速度
コンベンショナルタンク（通常のタンク） ワンウェイサージタンク	初期液位、タンク断面積、単純形状でない場合は容積線図
逆流を考慮しないモデル（逆止弁あり） 逆流を考慮するモデル	定格揚程、定格流量、定格回転数、定格効率、定格軸動力、完全特性、慣性（ポンプ、フライホイール、原動機）

Advance/FrontNet/Ω の基礎方程式のうち、運動量保存式を以下に示す。式の導出については文献[1][2]などを参照されたい。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + V \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\lambda Q}{2gDA^2} |Q| = 0 \quad (1)$$

ここで、

ピエゾ水頭 $H [m]$

管長手方法距離 $x [m]$

重力加速度 $g [m^2/s]$

流路面積 $A [m^2]$

流速 $V [m/s]$

体積流量 $Q [m^3/s]$

Darcy の管摩擦係数 $\lambda [-]$

管径（内径） $D [m]$

である。

地震の加振効果は、上記運動方程式に地震加速度を外力項として次のように加算することで計算に反映される。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + V \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\lambda Q}{2gDA^2} |Q| - \frac{G_{EW}(t) \cos \gamma + G_{SN}(t) \sin \gamma + G_{UD}(t) \sin \theta}{g} = 0 \quad (2)$$

ここで、

東西方向の加振加速度 $G_{EW} [m^2/s]$

南北方向の加振加速度 $G_{SN} [m^2/s]$

上下方向の加振加速度 $G_{UD} [m^2/s]$

配管の仰角 $\theta [rad]$

配管の東西方向に対する水平角度 $\gamma [rad]$

このうち、 θ はもとも入力データから設定するが、 γ は本機能用に入力データに追加した。また、 G_{EW} 、 G_{NS} 、 G_{UD} はそれぞれの方向の時系列地震波データから各タイムステップにおいて設定する。

Advance/FrontNet/Ω の機能として、解析結果は指定位置の圧力、流量等の時系列データや圧力分布がファイルに出力される。指定したタイムステップ単位で圧力変化を出力し、動画として確認することもできる。地震応答解析機能の組み込みにあたり、圧力変化の時系列データを Cooley-Tukey 型の高速 Fourier 変換(FFT)を行って、パワースペクトル密度(PSD)が評価できる計算機能も追加した。

3. Advance/FrontNet/Ω による計算例

3.1. 通常運転時の水平配管の地震応答解析

図 1 に示す管径 0.2m の南北に延びる水平配管系で、流速 0.865m/s で流れている通常運転状態

に、地震加速度を与えた。解析に設定する地震波は、一般財団法人日本建築センターの模擬波（基盤波）データ[3]を用いた。これは、建設省建築研究所と同センターとの共同研究により設計用入力地震動研究委員会が 1992 年にとりまとめたもので、一定の時間刻み幅(0.01s)単位の地震加速度の値で構成される。図 2 に入力で与えた地震波を示す。参考文献[4]によれば、この地震波は震度 5 弱程度の地震に相当する。

解析では 50s で地震が発生したとして、50s 以降の流体過渡解析を行った。

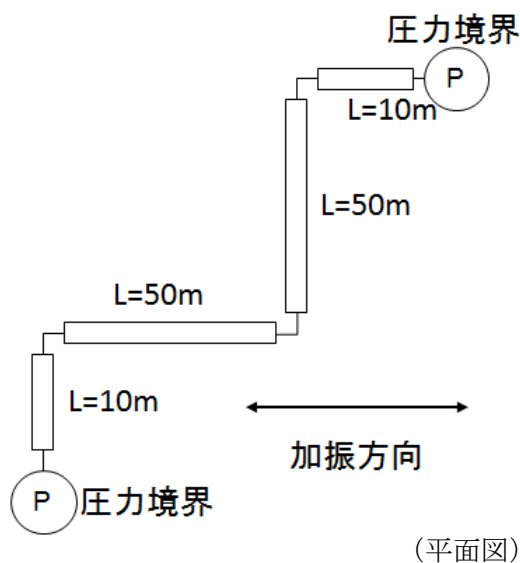


図 1 モデル体系 1

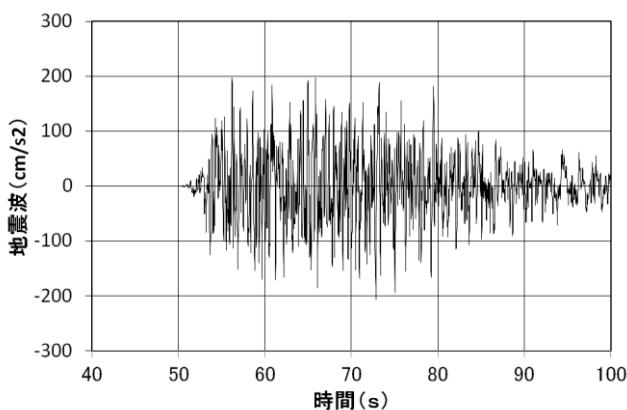


図 2 地震波

前章で紹介した改良 Advance/FrontNet/ Ω を用いて地震応答解析を行った結果を図 3 と図 4 に示す。

図 3 は、体系中央部における管内圧力の挙動である。50s からの地震によって圧力は激しく振動

する。地震波と比べて分かるように、管路の一部が加振方向と垂直であるために、管内流体への影響は一様ではなく、管内流体同士の衝突などによって、元の地震波より複雑な挙動を示している。特に 90s 以降の振幅の縮小は、管内流動の振動の相殺効果によるものと考えられる。

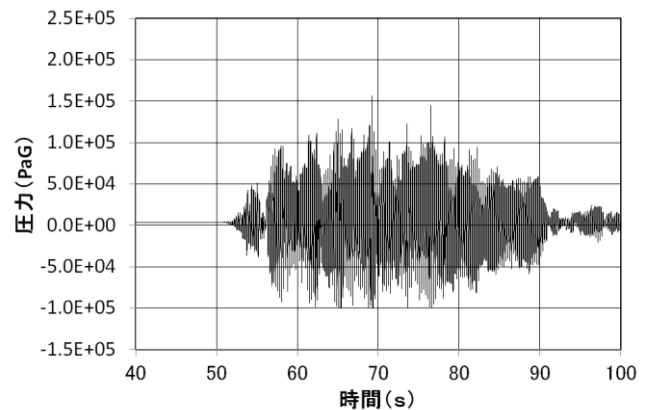


図 3 管内圧力変動
(モデル体系 1、東西方向を加振)

地震波の大きさの効果をみるため、地震加速度を東西方向に加えて、南北方向にも加えた場合の解析結果を図 4 に示す。着目位置は前掲図 3 と同じである。管内流体の相互作用により、単純に振幅が増えるわけではなく、振動の節が強調され

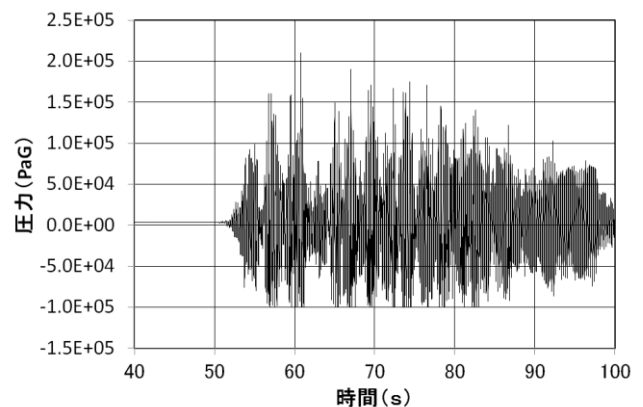


図 4 管内圧力変動
(モデル体系 1、東西方向、南北方向とも加振)

る結果となっている。また、液柱分離が生じているため、水撃圧がより高くなっている。

図 4 の圧力変化の時系列データを、高速 Fourier 変換を行って得られたパワースペクトル

密度を図 5 に示す。ところどころでピークがみられるのが分かる。

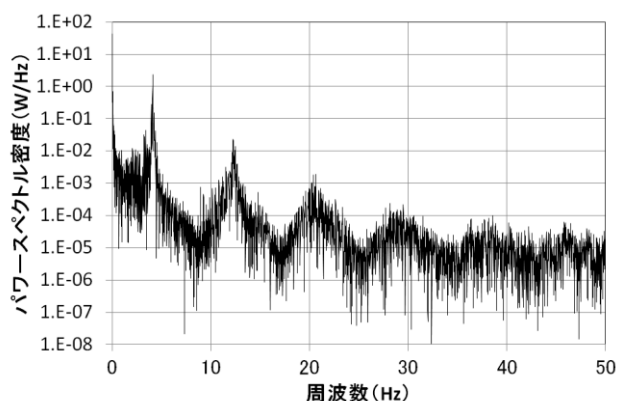


図 5 パワースペクトル密度（モデル体系 1）

3.2. 揚水配管のポンプトリップ時の地震応答解析

図 7 に示す管径 0.7m の配管体系で、満水で揚水中にポンプトリップが生じた際、同時に地震が発生したと想定して地震加速度を与えた。解析に設定する地震波は前述と同じく一般財団法人日本建築センターの模擬波を用い、流れ方向に加振させた。なお、解析では、ポンプトリップも地震も 200s で発生させるようにした。

比較のために、ポンプトリップが発生した時、地震が発生した場合と発生しない場合の解析を行った。前章で紹介した改良 Advance/FrontNet/Ω を用いた解析結果として、地震が発生しない場合の解析結果を図 7、地震が発生した場合の解析結果を図 8 に示す。

図 7 と図 8 の圧力変化を比較すると、ポンプ

トリップと同時に地震が発生した場合、地震加速度の影響で液柱分離が頻繁に激しく起こり、液柱衝突によって水撃圧が 1.5 倍程度大きくなっていることが分かる。

地震が発生した場合と発生しない場合について、図 7 と図 8 に示した圧力変化の時系列データのパワースペクトル密度を図 9 と図 10 に示す。地震が発生した場合の方が、パワースペクトル密度が大きいことが分かる。

図 11 に、地震が発生した場合の管内圧力分布を示す。図には、解析時間を通じての各地点の最大圧力・最小圧力分布が重ね描きされている。始めはなだらかに分布していた圧力が、ポンプトリップと地震による加振によって複雑な分布カーブを描くことが分かる。本図は、よりきめ細かくファイル出力することにより動画としてみることもできる。

4. おわりに

当社で開発・整備してきた管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Ω を基とした管路系の地震応答解析を紹介した。本稿で紹介した改良版 Advance/FrontNet/Ω は、近くリリースする予定である。このソフトウェアが、実際の管路系の地震に対する健全性の検討に資することを期待する。

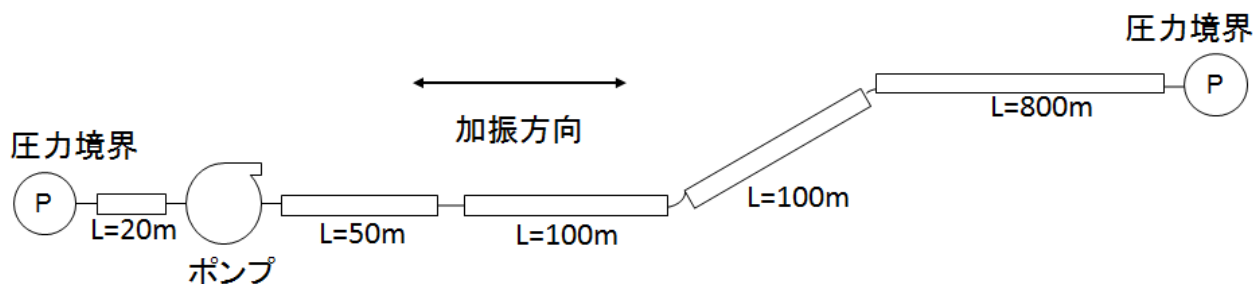


図 6 モデル体系 2

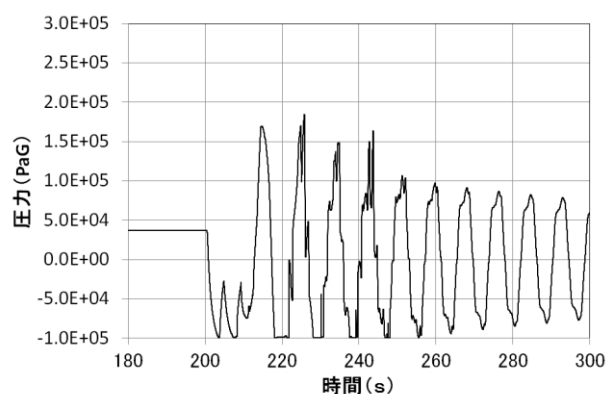


図 7 管内圧力変動（モデル体系 2、地震なし）

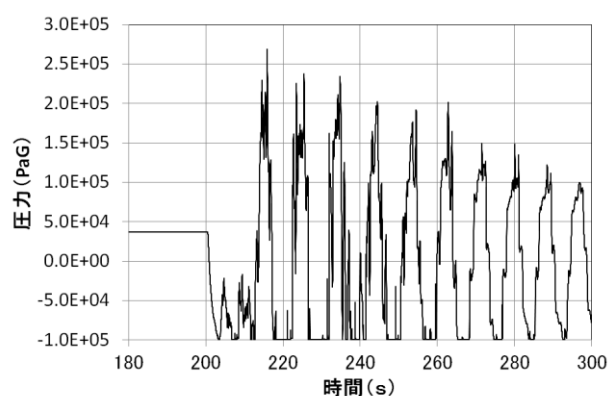


図 8 管内圧力変動（モデル体系 2、地震あり）

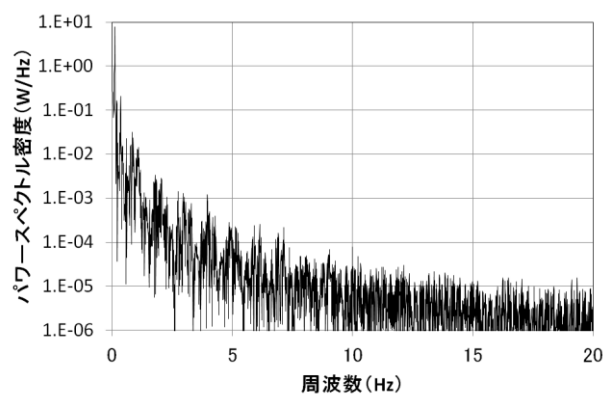


図 9 パワースペクトル密度
（モデル体系 2、地震なし）

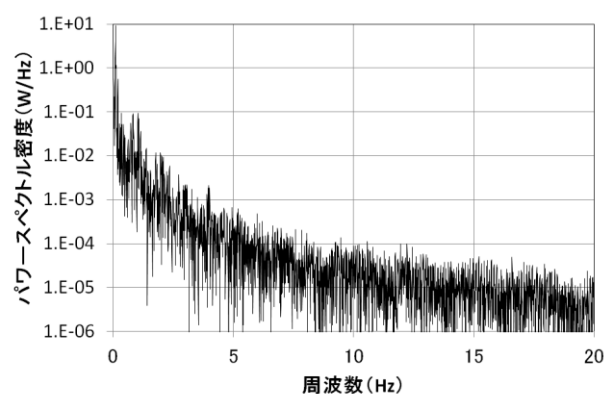


図 10 パワースペクトル密度
（モデル体系 2、地震あり）

※次ページにあります。

図 11 管内圧力分布変化（モデル体系 2、地震あり）

参考文献

- [1] 松尾一泰, “圧縮性流体力学—内部流れの理論と解析—”, 理工学社 (1994)
- [2] 小池秀耀, 三橋利玄, 浜野明千宏, “富士総合研究所編 管路内の流れのシミュレーションプログラム”, 丸善株式会社 (1995)
- [3] <http://www.bcj.or.jp/download/wave.html>
- [4] <http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/html/how-to-use.htm>

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、【カラー版】がダウンロードできます。（ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。）

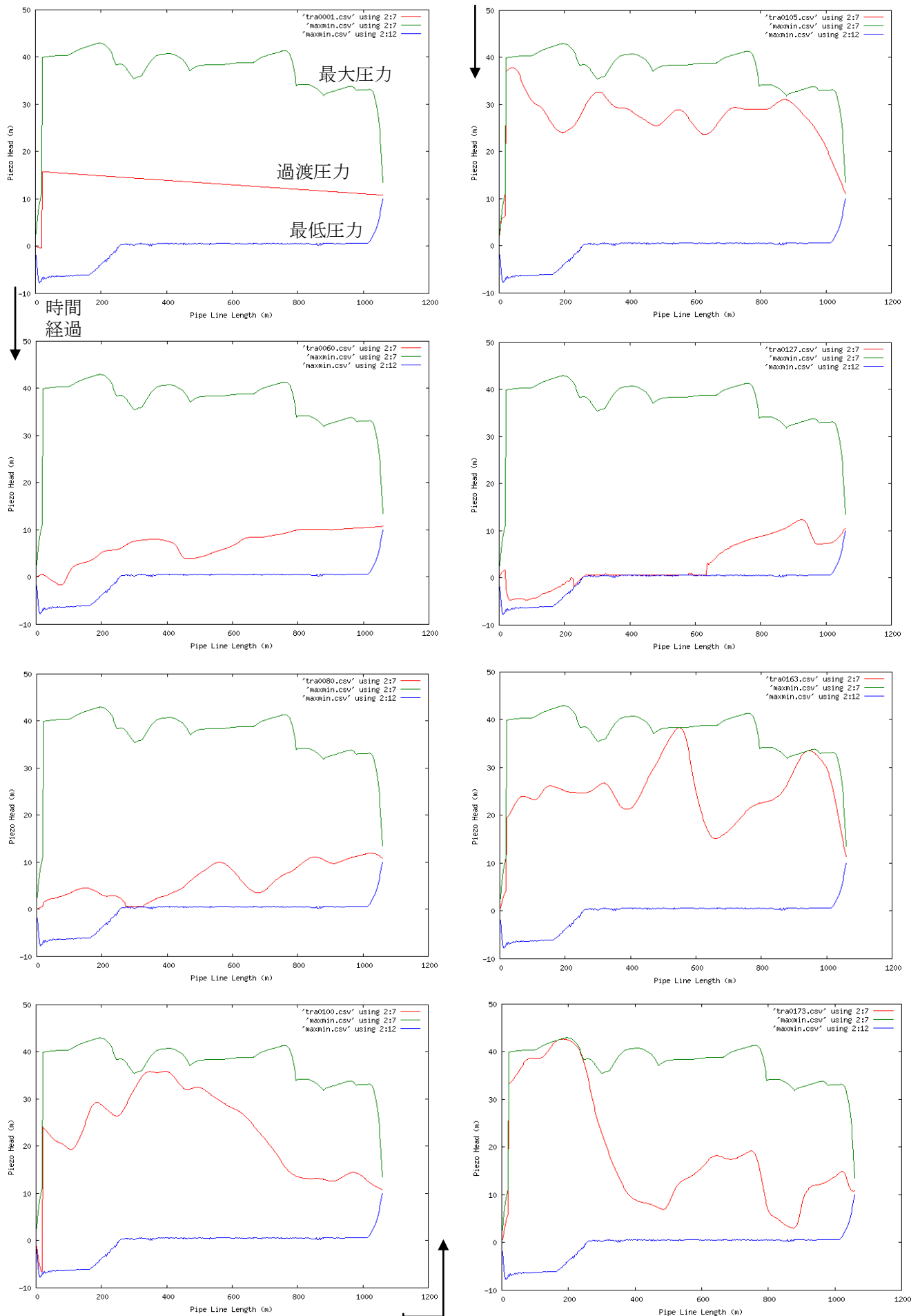


図 11 管内圧力分布変化 (モデル体系 2、地震あり)