

地震時における管路内動水圧変化の解析（その 1）

Analysis of Pressure Changes in a Pipeline under Seismic Conditions (Part 1)

○坂本大樹*, 吉村英人*, 眞鍋尚*, 伊藤俊輔**, 佐藤信光**

SAKAMOTO Daiki, YOSHIMURA Hideto, MANABE Takashi, ITO Shunsuke, SATO Nobumitsu

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した三陸沖を震源とする東北地方太平洋沖地震では、茨城県の霞ヶ浦用水施設において、管路に設置されている空気弁の破損が複数の箇所であった。その原因の一つとして、地震の揺れに起因する管路内の動水圧変化が考えられるが、当時の管路内の状況は不明である。地震時における管路内の動水圧変化を把握するには、数値解析が有効である。しかし、長距離管路を対象に地震波を考慮した動水圧計算を行い、現象の再現性について検証した例は、少なくとも著者の知る限り見当たらない。水資源機構では同施設内において、2015 年 11 月から 2016 年 10 月の一年間、地震加速度および管路内動水圧の計測を行ってきた。本論では、この計測データを対象に 1 次元管路流れ解析を実施し、その結果について比較検討を行った。

2. 霞ヶ浦用水施設の概要

本解析では、図-1 に示す霞ヶ浦揚水機場から吐出水槽までの送水路区間を対象とした。全長約 21 km、管内径 2.2 m、高低差約 50 m の長距離管路であり、揚水機場に設置されたポンプにより送水されている。また、対象区間には 3 箇所のサージタンクと約 50 箇所の空気弁が設置されている。動水圧は圧力センサー（100 Hz）を用いて、揚水機場敷地内の 1 号制水弁、上流から 0.6 km 地点の 1 号サージタンク、上流から 7~8 km 地点の 17 号および 18 号空気弁で計測した。また、1 号制水弁で地震加速度（ES, NS, UD 成分）の計測を行った。計算は計測期間中に発生した地震のうち、比較的規模が大きかった、2016 年 5 月 16 日の茨城県南部を震源とする地震（マグニチュード 5.5、施設管内最大深度 5 弱）を対象として行った。このときのポンプ揚程は 56.65 m、送水流量は 2.15 m³/s であった。

3. 計算手法および計算条件

解析には管路系水撃解析プログラム u-FLOW/WH¹⁾ を用い、特性曲線法により行った。基礎方程式は 1 次元圧縮性流体の質量保存式と運動方程式であり、それぞれ以下の式(1)および式(2)である。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin\theta \right) = 0 \quad (1)$$

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

ここで、 H は圧力水頭[m]、 t は時間[s]、 a は圧力伝播速度[m/s]、 g は重力加速度[m/s²]、 A は管断面積[m²]、 Q は流量[m³/s]、 V は管断面平均流速[m/s]、 θ は管勾配、 f は管摩擦損失係数、 D は管内径[m]である。また、 α は管軸方向に作用する地震加速度[m/s²]であり、管

* みずほ情報総研株式会社 Mizuho Information & Research Institute, Inc.

** 独立行政法人水資源機構 Incorporated Administrative Agency Japan Water Agency

[Key Word] 水撃圧, 特性曲線法, 地震波, パイプライン

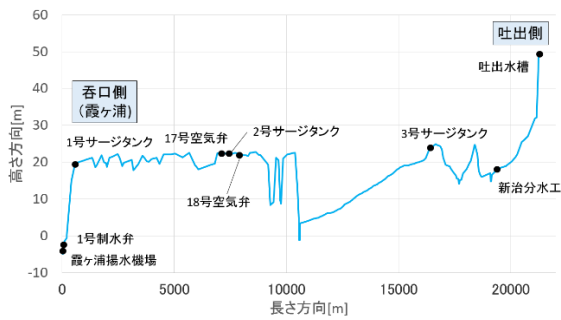


図-1 霞ヶ浦用水管路モデル図
Schematic of pipeline model

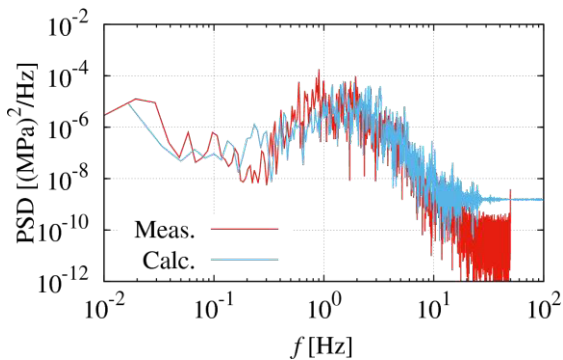


図-2 18号空気弁における動水圧のパワースペクトル Power spectrum of pressure fluctuation at the No. 18 air valve

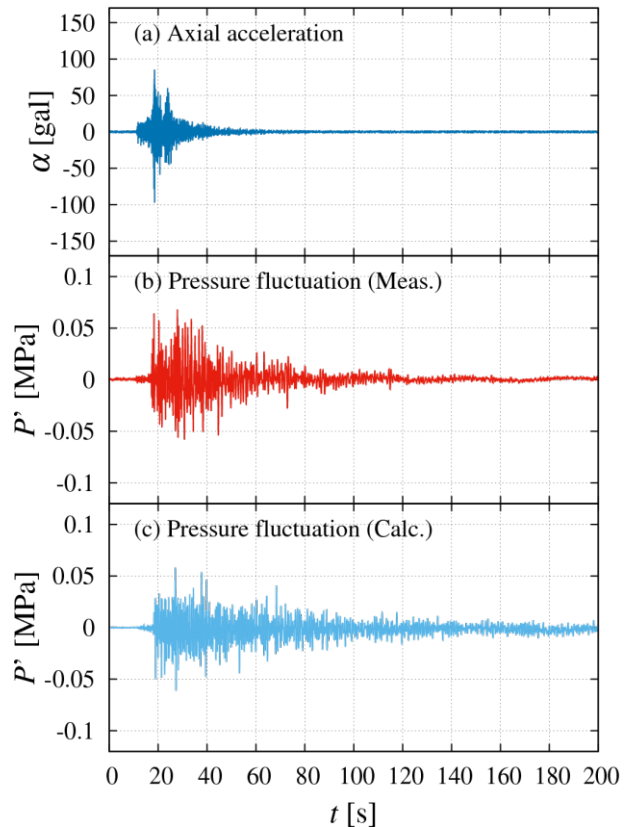


図-3 18号空気弁における管路内動水圧変化 Pressure fluctuation at the No. 18 air valve

の方向ベクトル $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ と地震加速度ベクトル $\vec{a} = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ (x は EW, y は NS, z は UD 成分) を用いて, $\alpha = \vec{n} \cdot \vec{a}$ として与えられる. 解析にあたり, 対象区間の管路モデルを平面座標および高さを考慮して作成し, 水柱分離や各流体機器 (ポンプ, サージタンク, 空気弁) は文献¹⁾にもとづいてモデル化した. 1号制水弁で計測された地震加速度を管内全体で同時に作用させ, 地震発生後 200 秒の計算を行った.

4. 結果および考察

図-3 に 18 号空気弁における動水圧の計測値と計算結果を示す. 管軸方面の地震加速度も併せて示す. 地震加速度は 20 秒付近で最大となる. その後, 25 秒付近で再度大きくなったのち, 急激に小さくなっている. 一方, 動水圧は地震の発生とともに変動が大きくなり始めるが, 30 秒付近で最大値を示しており, 圧力変動のピークが加速度のピークよりも遅れて表れている. 計算結果においても, 30 秒付近で振幅が大きくなる様子が確認でき, 計測値の傾向を再現できていると言える. また, 図-2 に示すとおり, 動水圧のパワースペクトルについても計測値と計算結果で概ね一致している.

5. おわりに

霞ヶ浦用水の送水路区間を対象に, 地震波を考慮した 1 次元管路流れ解析を実施し, 管路内の動水圧変化を計測データと比較した. その結果, 圧力変動が地震加速度よりも遅れて増幅されるという特徴や, 圧力変動の周波数特性を再現できていることが確認できた.

参考文献

- 1) 富士総合研究所, “管路内流れのシミュレーションプログラム”, 丸善株式会社, 1995.