

水撃圧作用を利用したモデルパイプラインの応力場同定に関する研究 Use of Water-Hammer Phenomena for Detection of Stress Field in Model Pipeline

○齋藤真歩*・小峯悠汰**・鈴木哲也**・浅田洋平***・木村匡臣***・安瀬地一作****

○Maho Saito, Yuta Komine, Tetsuya Suzuki, Yohei Asada, Masaomi Kimura and Issaku Azechi

1. はじめに

パイプラインは水撃圧に代表される非定常流況過程において管軸方向と周方向に応力場の影響を受けて変形する。その理論解は、周方向が軸方向と比べ2倍の変形量を有する事が確認されている¹⁾。本研究では、欠損を施したモデルパイプラインを対象に、水撃圧により均一応力場を形成し、3次元画像解析による管体の応力場の同定を試みた。

2. 実験・解析方法

実験対象施設は管路延長 900.43 m, 内径 24.2 mm, 外径 27.2 mm, 管種はステンレス鋼 (SUS304) である。下流から 24.43 m 上流にき裂を長さ 50 mm のスリットにより模したモデル管体を配置した。下流端には電磁弁が取り付けられ、弁の閉塞は急閉塞の条件が成立する。実験は下流末端弁の閉塞により圧力波を発生させ、モデル管体に対し可視画像計測を行った。スリット深さ条件を 0.5 mm, 1.0 mm およびスリットなしの3条件, 最大水圧を 0.52 MPa, 0.67 MPa および 0.85 MPa の3条件とし Case 1 から Case 9 と設定した。ステレオ撮影で得た画像に対し3次元画像解析を行い、管体表面の変形量を解析的に求めた。解析条件はサブセット長 51×51 pixel およびステップサイズ 5 pixel とした。1 pixel の大きさは約 0.125 mm (スリット部) とした。

3. 結果および考察

3.1 内圧を受ける管の応力と変形

パイプラインに内圧が作用した時の応力

を求める。モデルパイプラインを両端閉鎖の厚肉円筒と仮定し、パイプライン表面の軸方向応力を式 (1) に、周方向応力を式 (2) に示す。

$$\sigma_z = \{a^2/(b^2 - a^2)\}p \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \{a^2/(b^2 - a^2)\}2p \quad (2)$$

ここで σ_z : 軸方向応力 (N/mm²), σ_θ : 周方向応力 (N/mm²), p : 内圧 (MPa), a : 内半径 (mm) および b : 外半径 (mm) である。式 (1) 式 (2) から周方向応力が軸方向応力より2倍の値をとる。水圧と画像解析から得た管の周方向変位と軸方向変位の時系列データを図-1 に示す。同図より理論値と実測値との一致が確認された。軸方向変位は水圧の周期とほぼ一致した。周方向変位は各種振動要素が混在していることが確認された。

3.2 管体振動の影響評価

実験において管体振動が確認され、画像解析に影響を与えた。画像解析で確認される変位の原因は水圧による管の変形とパイプラインの拘束条件による管体振動の2種類である。これらを、高速フーリエ変換 (以後 FFT と記す) を用いて分類を試みた。パイプライン構造から、両端支持で中心に集中荷重を受けたはりと仮定し、固有振動数を求めた (式 (3), 式 (4))。

$$f_1 = (\pi/2l^2)\sqrt{EI/(\rho S)} \quad (3)$$

$$f_p = f_1/\sqrt{1 + B(P/W)} \quad (4)$$

*山形県庁 (元新潟大学農学部) Yamagata Prefectural Government (Faculty of Agriculture, Niigata University)

**新潟大学農学部 Faculty of Agriculture, Niigata University

***東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

****農研機構農業工学研究部門 National Institute for Rural Engineering, NARO

キーワード: パイプライン, 非定常流況, 画像解析, 非破壊検査

ここで、 f_i ：固有振動数 (Hz)， f_p ：集中荷重を受けた固有振動数 (Hz)， E ：縦弾性係数 (N/mm²)， I ：断面二次モーメント (mm⁴)， l ：区間長 (m)， ρ ：単位体積あたりの質量 (kg/m³)， S ：断面積 (mm²)， B ：集中荷重係数， W ：区間パイプライン質量 (kg) および P ：集中荷重 (kg) である。モデルパイプラインの固有振動数は 4.47 Hz である。水撃圧由来の周波数を計測水圧の FFT により求めた。計測水圧の FFT の結果を図-2 に示す。図-2 より 0.3 Hz 帯に高い振幅値が確認された。画像解析で求めた変位データに対して FFT を行った結果を図-3 に示す。結果より水撃圧由来の周波数帯と管体振動由来の周波数帯に高い振幅値が確認された。

3.3 破壊力学指標による応力集中評価

水撃圧の2波目の通過時のスリット近傍における応力分布の理論値と実測値を図-4 に示す。理論値は計測水圧を用いて式(5)式(6)より求めた。

$$\sigma_0 \sqrt{\pi a} = K \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = K / \sqrt{2\pi r} \quad (6)$$

ここで、 σ_θ ：周方向応力 (N/m²)， K ：応力拡大係数 (Pa $\cdot\sqrt{m}$)， σ_0 ：負荷応力 (N/m²)， a ：スリット長さ (m)， r ：スリット端からの距離 (m) である。実測値は画像解析で求めた周方向ひずみに対し、管体振動である 4.47 Hz 帯以上にローパスフィルター処理を行った周方向ひずみを用い算出した。その結果、スリット近傍 4 mm 付近までで応力集中が確認できた。

4. おわりに

3次元画像解析を援用し、モデルパイプラインを評価した。その結果、周方向変位は軸方向変位と比べ2倍の値をとり、理論値との一致が確認された。スリット端での応力集中が確認され、提案する方法により応力場を同定できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Reynold King Watkins and Loren Runar Anderson : Structural Mechanics of Buried Pipes, 19 Stress Analysis, CRC Press, pp. 239-268, 2000.

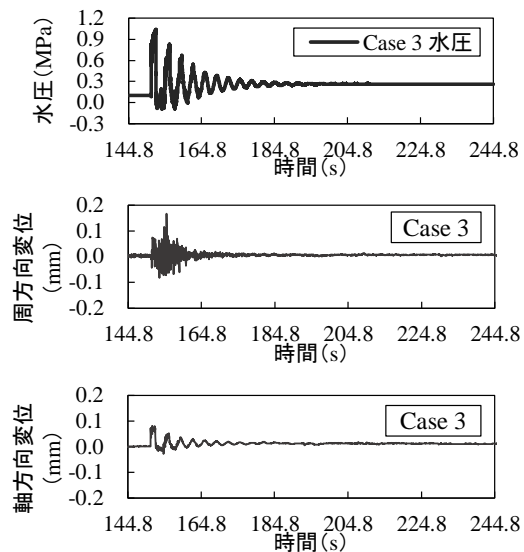


図-1 時系列データ (画像計測地点)

(上：水圧，中：周方向変位，下：軸方向変位)

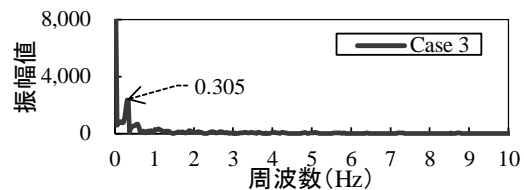


図-2 水圧 FFT 結果

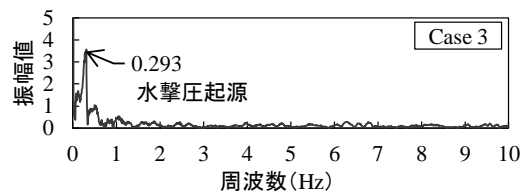
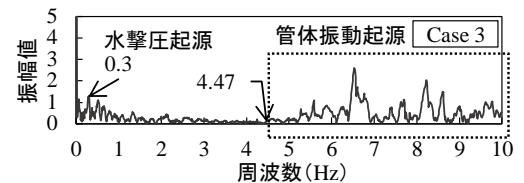


図-3 変位 FFT 結果 (上：周方向，下：軸方向)

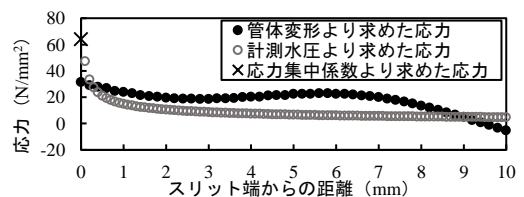


図-4 スリット近傍での応力集中