

株式会社アルファ技研 ○下館 千尋

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 寺田 健司・大久保 天

川口 清美・中村 和正

1. はじめに

営農に必要な用水を安定的に供給するパイプラインの安全性を確保するためには、設計時において内圧を適切に考慮する必要がある。農業用パイプラインに発生する非定常な内圧には主に水撃圧と地震時動水圧がある。水撃圧は設計において考慮されている一方で、地震時動水圧はその実態が十分に把握されていないため、現時点で農業用パイプラインの設計では考慮されていない。しかしながら、地震に起因する管内圧の上昇により、パイプラインに被害が生じた事例も報告されており（伊藤ら，2018），設計段階で地震時動水圧がどの程度発生するかを予測することは、重要であると考えられる。

本研究では、弾性体理論に基づく非定常流解析に中川（1969）の示した地震時動水圧の計算式を組み込み、地震時における管内動水圧変化の再現を試みた。

2. 解析の概要

2.1 解析区域の概要

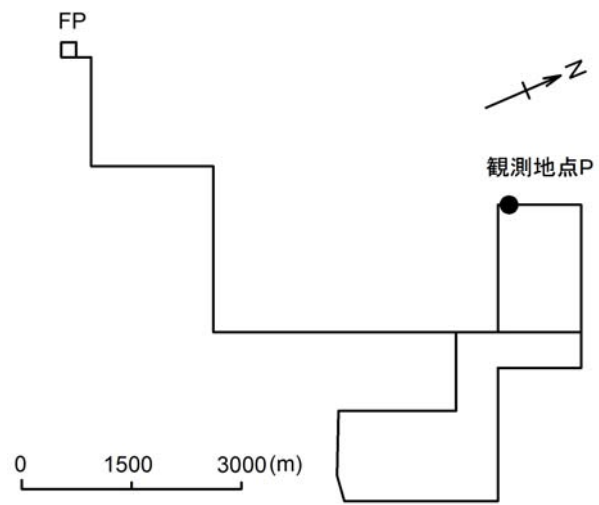
解析は北海道内で畑地灌漑用に埋設されたパイプラインを対象に行った。配管の概形を Fig. 1(a)に示す。この地域は管の標高差が約 90m となっており、上流のファームポンドを起点として $\phi 100\sim 700$ の DCIP 管が管網配管されている。当地域では、寒地土木研究所が 2014 年 10 月から Fig. 1(a)に示す観測地点 P において、東西・南北・上下方向の地盤の加速度と管内水圧を常時計測している（大久保ら，2018）。

2.2 基礎式

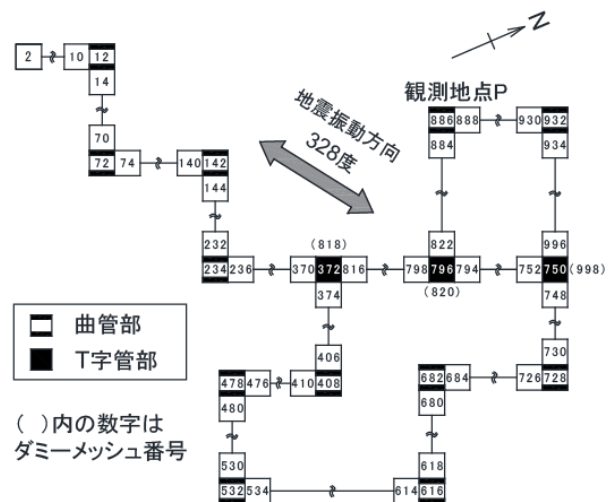
支配方程式のうち運動方程式に式(1)を、連続式に式(2)を用いる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{v^2}{2gD} = 0 \dots (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + v \sin \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \dots (2)$$



(a) 対象地区概形



(b) メッシュ番号

Fig. 1 パイプラインモデル図
Pipeline model

ここで、 t : 時間 (s) , g : 重力加速度 (=9.8m/s²) , v : 管内流速 (m/s) , x : 距離 (m) , H : 基準線からの圧力水頭 (m) , f : 摩擦損失係数 , D : 管内径 (m) , θ : 管路勾配 , a : 圧力伝播速度 (m/s) である (農林水産省農村振興局整備部設計課, 2009) . VBA (Microsoft Visual Basic for Applications) により作成したプログラムを用いて式(1)および(2)を中心差分法により解いた.

解析区域をメッシュ分割した図を Fig. 1(b)に示す. T 字管部にはダミーメッシュを配置することにより分流や合流の影響を考慮した (吉野・栗田, 1996) . 本研究では Fig. 1(b)に示すように異形管 (T 字管 3 カ所・曲管 12 カ所) を表すメッシュを定義し, 後述する地震時動水圧を作用させた. また, 距離差分 Δx および時間差分 Δt をそれぞれ 25m, 0.04s とした.

2.3 管内の地震時動水圧の計算方法

中川 (1969) を参考に, 管路モデルの異形管部メッシュに地震時動水圧 $\sigma(t)$ (t/m²) を作用させた.

$$\sigma(t) = -C \frac{\alpha g T k}{2\pi v_s \left(1 + 2 \frac{kr}{Ee}\right)} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v_s}\right) \cdot \dots \cdot (3)$$

$$\text{ただし, } C = \begin{cases} \sin \frac{\theta_{pipe}}{2} \sin \left(\theta_a + \frac{\theta_{pipe}}{2}\right) & \text{(曲管の場合)} \\ \frac{A_2/A_1}{2 + A_2/A_1} & \text{(T字管の場合)} \end{cases} \cdot \dots \cdot (4)$$

ここに、 α : 震度 (重力加速度 g に対する地震加速度の比) , T : 地震動の周期 (s) , k : 水の体積弾性係数 (t/m²) , w : 水の単位容積重量 (=1.0t/m³) , v_s : 管内の圧力伝播速度 (m/s) , r : 管半径 (m) , E : 管材料の弾性係数 (t/m²) , e : 管厚 (m) , θ_{pipe} : 管の屈曲角 (°) , θ_a : 1つの管軸と震度方向のなす角度 (°) , A_1 : 本管断面積 (m²) , A_2 : 枝管断面積 (m²) である. 地震振動方向は、2016年1月14日の浦河沖を震源とした M6.7 の地震を計測した加速度計の値を参考に決定した (Fig. 1(b)) . 地震波は解析開始後 5 秒時点から 5 波与え, その後 300 秒間の計算を行った. 地震の規模を決定するパラメータである, 加速度 α を 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 の 5 種類, 周期 T を 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 の 4 種類とし, 計 20 ケースの解析を実施した. その他のパラメータは現場のデータに基づいて設定した.

3. 解析結果と考察

3.1 動水圧の時間変化

$T=1.0$, $\alpha=0.1$ としたときにおける P 点 (メッシュ 886 地点) での動水圧の計算値を Fig. 2 に示す. 最初の 3 波までは 886 地点に対して(3)式で与えた動水圧に近い動水圧が得られたが, それ以降は(3)式で与えた値とは異なっていることがわかり, 他の異形管部から伝播してきた動水圧と干渉していることが確認できる. また, 時間経過に伴う動水圧の減衰がほとんど確認できず, 本モデルでは既往の文献 (大久保ら, 2018) に示されているような実測の動水圧の時間に対する減衰状況を再現するには至らなかった. 計算では, 継手の伸縮などの現象を考慮していないことなどが原因であると考えられる.

3.2 動水圧が大きくなる箇所

Fig. 3 に $T=1.0$, $\alpha=0.1$ とした計算で各メッシュ地点に生じた最大動水圧の計算値を示す. 図中には, 各地点の管内径の分布もあわせて示す. 最大動水圧は管径が小さい箇所で大い傾向が見て取れるが, 特に管径が大きく縮減するメッシュ 930~952 地点で非常に大きな動水圧が生じている. 以上の傾向は

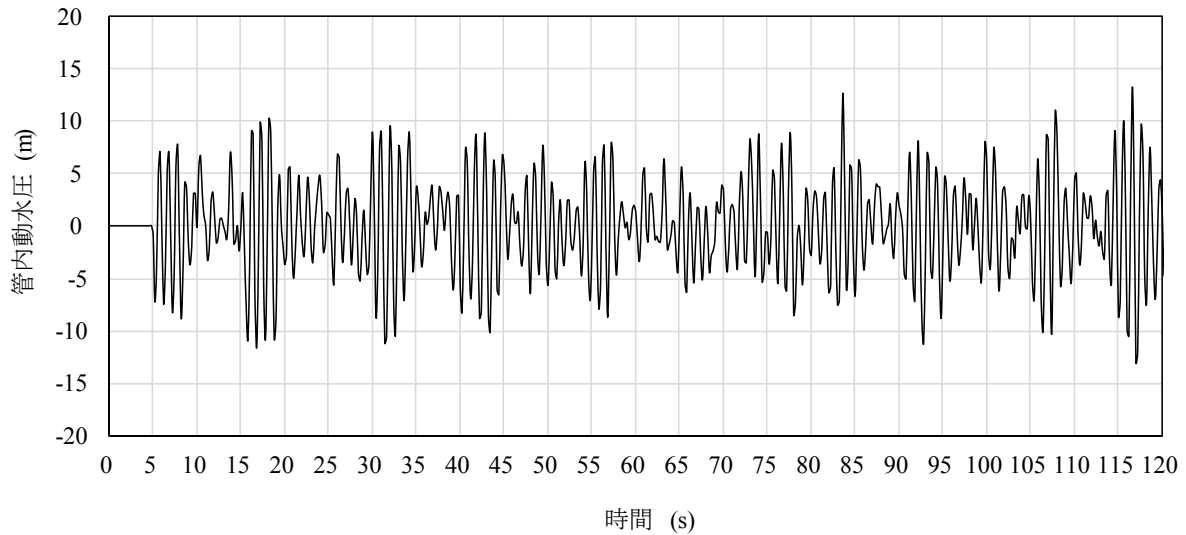


Fig. 2 観測地点 P で生じる動水圧の計算結果
Calculated dynamic water pressure at P

その他の震度 α 、周期 T の組み合わせにおいても同様に認められた。今後、近傍区間に比べて管径の小さい区間における動水圧の実測による検証が必要である。

3.3 地震動と最大動水圧の関係

Fig. 4 に P 点 (メッシュ 886) で計算された最大動水圧と震度 α の関係を示す。最大動水圧と震度には比例の関係が認められる。一方で周期 T に着目すると、最大動水圧は $T=1.2$ の時に最大値を、 $T=0.8$ のときに最小値をとっていることがわかり、相関がほとんど認められないことがわかる。これは、地震動の周期が変わることで、各異形管部で生じた動水圧の干渉のしかたが変化するためであると考えられる。

大久保ら (2018) は、現場で計測した動水圧の最大値と、地震時における地盤の最大水平速度との間に正の相関関係があることを示した。本研究の計算結果でも、この両者に正の相関関係があるのかを確認する。本研究における地震加速度は、振幅が ag の正弦関数により与えているため、地震動の最大速度 V_{\max} は以下の式により求められる。

$$V_{\max} = \frac{\alpha g T}{2\pi} \dots \dots \dots (5)$$

Fig. 5 に式(5)で計算した最大速度と最大動水圧の関係を示す。ここでは、メッシュ番号 886 (観測地点 P) と 934 付近で計算された動水圧の結果を示している。このように、計算結果においても地盤の

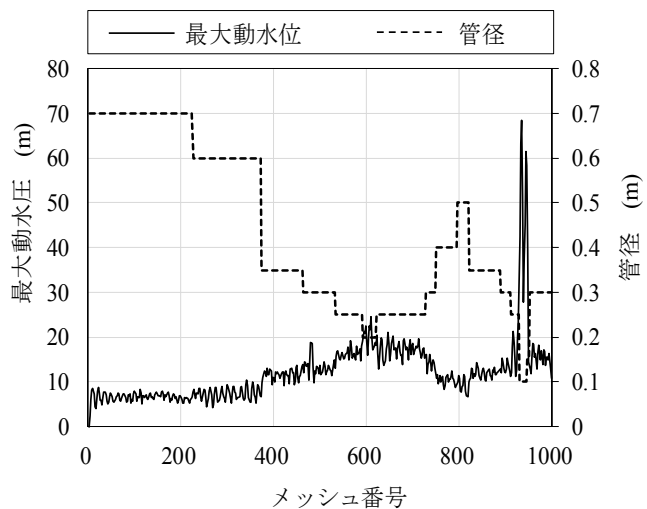


Fig. 3 5 波の時の各メッシュ番号での最大動水圧
Maximum dynamic water pressure
of each mesh number by five waves

最大速度と最大動水圧の間には相関関係がみられ、原点を通る直線で回帰式を作成すると、決定係数 R^2 がそれぞれ 0.71 および 0.86 となった。

4. おわりに

本研究では、管網配管されたパイプラインシステムを対象に、地震時における管路内動水圧のシミュレーションを実施した。その結果、地震時動水圧の時間的な変化を定量的に再現するには至らなかったが、管路に生じた最大動水圧と地震の揺れの最大速度に着目してデータ整理を行うことで、実測値と類似の結果が得られることがわかった。また、管の内径が近傍区間より小さい区間では地震時動水圧の計算値が大きくなる傾向があり、今後、実測等による検証が必要である。

参考文献

- 1) 伊藤俊輔, 佐藤信光, 坂本大樹, 吉村英人, 眞鍋尚 (2018) : 地震時における管路内動水圧変化の解析 (その 2), H30 農業農村工学会大会講演会公演要旨集[8-7].
- 2) 中川義徳 (1969) : 送配水管路における地震時動水圧についての理論的研究, 水道協会雑誌, No.416, 26-35.
- 3) 吉野秀雄, 栗田吉晴 (1996) : 管水路 (パイプライン) の設計手法 (その 5) 中心差分法を用いたパイプライン非定常水理解析, ARIC 情報 No.42, 5-22.
- 4) 大久保天, 立石信次, 今泉祐治, 中村和正 (2018) : 農業用管水路における地震時動水圧の事例報告, 寒地土木研究所月報, No.783, 2-7.
- 5) 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2009) : 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」, 農業農村工学会, 218-260.

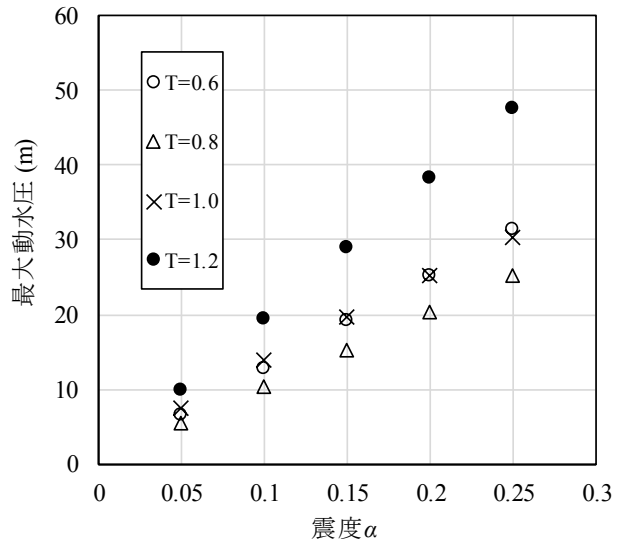


Fig. 4 P点における震度 α ・周期 T と最大動水圧の関係

Relationship between α , T and maximum dynamic water pressure at P

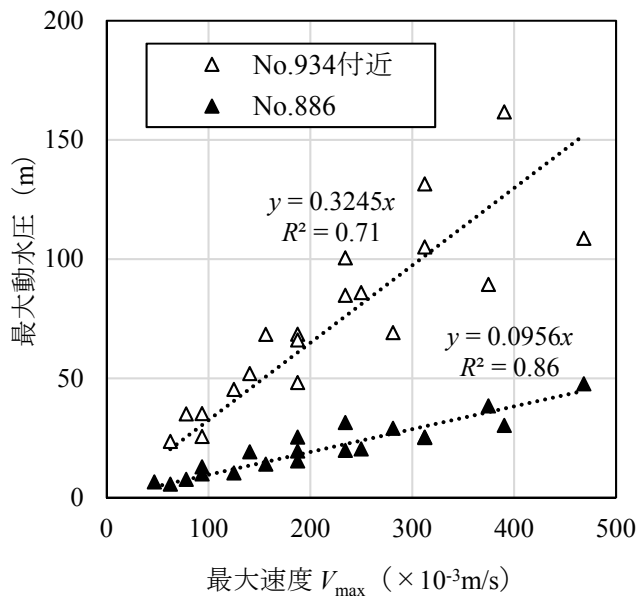


Fig. 5 地盤の最大速度 V_{max} と最大動水圧の関係

Relationship between V_{max} and maximum dynamic water pressure