

常時計測による灌漑用管水路における 地震時動水圧の実態評価

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム ○萩原 大生
大久保 天
南雲 人

灌漑用管水路では、地震に伴う管内の水圧変動である地震時動水圧が発生する。地震時動水圧により、曲管部の継手や空気弁の部品の離脱といった農業水利施設の被災が確認されている。地震時動水圧の実態を把握することは維持管理の観点から不可欠である。本研究では、常時計測により捉えた既設管水路における地震時動水圧に対して、数値シミュレーション法の適用を検討し、実態評価を試みた検討結果について報告する。

キーワード：管水路、地震時動水圧、常時計測、非定常流況、数値シミュレーション

1. はじめに

灌漑用管水路は、水田や畑に水を送る送配水システムを構成し、営農に不可欠な施設である。地震時において、灌漑用管水路では、内部の水と管材の相対速度に伴う動的な圧力である動水圧（以下、地震時動水圧と記す）が発生することが確認されている¹⁾²⁾。灌漑用管水路における地震時動水圧について、近年まで詳細な実態が不明であったことから、管水路の設計や維持管理にその影響は十分に考慮されていない。地震時動水圧は設計で許容される水圧を超える可能性があり³⁾、既設管水路やその付帯施設における事故が起きている（図-1参照）。地震時動水圧の実態を捉えることは、適切な施設の維持管理および設計において不可欠な情報のひとつである。本研究では、既設パイプラインに設置した水圧と地震動加速度の観測装置より得られた常時計測のデータに基づき、数値シミュレーションにより現象の再現を試みた検討結果について報告する。

2. 計測方法

(1) 地震時動水圧

地震時動水圧は地震に伴う管体と管内の水の相対速度により生じる。地震時動水圧は管体における閉端部、曲管部、T字部および片落部で生じるとされる（図-2）¹⁾。管路内における地震時動水圧は、水道分野で中川⁴⁾により理論的に取りまとめられた。管路の閉端部を考えると、地震時の管体と水の相対速度に伴い、水が管体に押さる

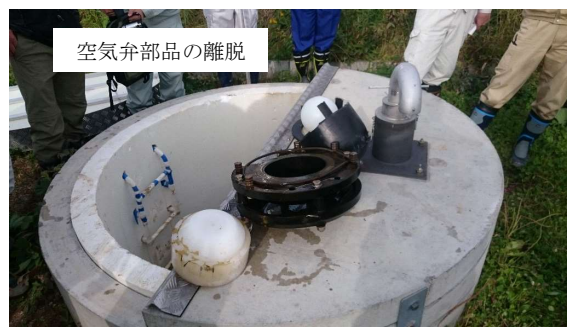


図-1 過度な水圧上昇に伴う空気弁の事故事例

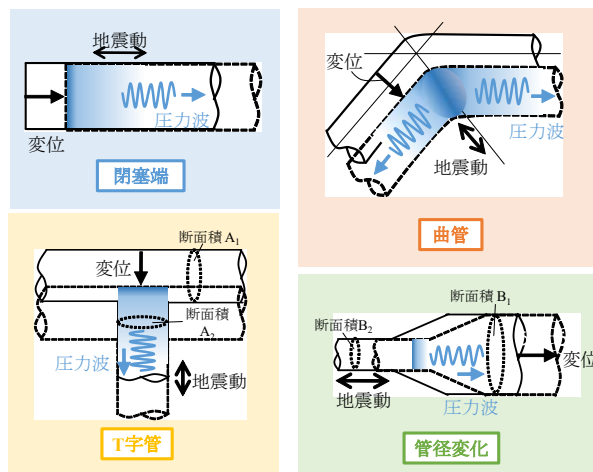


図-2 管水路における地震時動水圧の主な発生箇所¹⁾

ことによる圧力の上昇とその解放による圧力の下降が生じる。これに伴う圧力波が管内を伝播し、水圧変動を引き起こす。圧力波伝播速度は管内の流体と管材の複合作用により決定され、水の密度、体積弾性係数、管材の管径、管厚、弾性係数に基づいている。地震時動水圧の発生により、管内は非定常流況となる。

(2) 計測システム

既設管水路を対象に、管内の水圧と地震動加速度の常時計測を行った。対象施設として、畑地灌漑の管網システムを選定した。管網とは、網目状に管路が連結され、管の分岐と合流が存在する施設である。図-3に対象施設の模式図を示す。観測地点は地震時動水圧が発生しやすいとされる曲管部に設けた。計測システムは、その曲管部付近に位置する空気弁室に設置した。空気弁とは、管内に混入している空気を排気するための付帯施設である。この空気弁がつながっている本管の管体は、管径が350 mm、管厚が5 mm、材料はダクタイル鋳鉄である。空気弁室に設けた計測システムの状況を図-4に示す。水圧センサは空気弁から分岐した枝管に取り付けた。地震動の加速度センサは、地中に埋設されたパイプラインに直接設置することが困難なため、空気弁室底のコンクリート基礎の上に設置した。加速度は東西、南北および上下の3方向を計測した。水圧および加速度について、データロガーにより、100 Hzで計測を実施した。

3. 解析方法

(1) 基礎式

農林水産省農村振興局整備部設計課による土地改良事業計画設計基準及び運用・解説の設計「パイプライン」に記される弾性体理論に基づく非定常流況の運動方程式および連続式ならびに先行研究を参照し、管水路内の地震時動水圧の基礎式を適用する⁹⁾。地震動の影響を考慮した運動方程式を(1a)、連続式を(1b)に示す。

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| + \alpha = 0 \quad (1a)$$

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

ここで、 H はピエゾ水頭 (m)、 V は管内の平均流速 (m/s)、 D は管径 (m)、 g は重力加速度、 θ は水路勾配である。 α は地震動加速度の管軸方向成分 (m/s²) であり、東西・南北・上下方向の座標系に対する管軸の方向余弦と加速度ベクトルの内積により求める。 a は圧力伝播速度 (m/s) であり、式(1c)により求める。

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{w_0}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{DC}{Et} \right)}} \quad (1c)$$

HAGIWARA Taiki、OHKUBO Takashi、NAGUMO Hitoshi

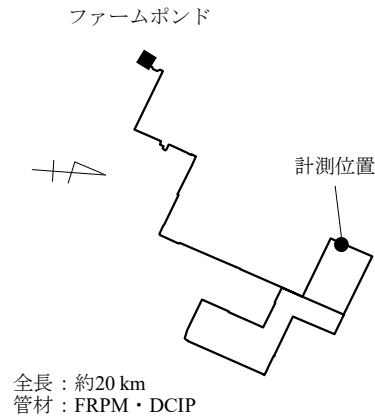


図-3 計測対象の灌漑用管水路

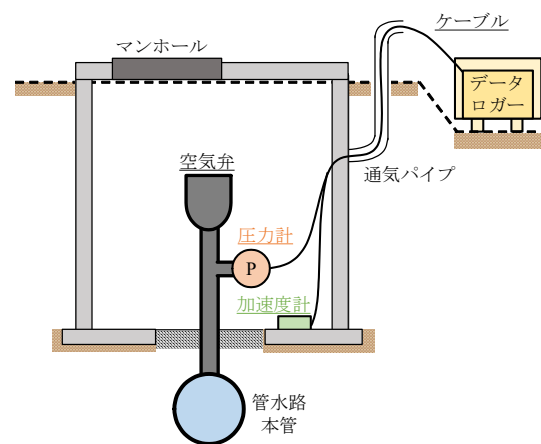


図-4 計測システムの模式図

ここで、 w_0 は水の単位体積重量 (kN/m³)、 K は水の体積弾性係数 (kN/m²)、 E は管材の弾性係数 (kN/m²)、 t は管厚 (m)、 C は管の埋設状況による係数である。

(2) 数値計算方法

特性曲線法により、式(1a)および(1b)を数値的に解く。なお、式(1a)の $V \frac{\partial V}{\partial x}$ と式(1b)の $V \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \sin \theta \right)$ は微小項とされることから、本計算では省略した。特性曲線法では、基礎式である2式を未定乗数により線形結合することで常微分方程式に変換し、未定乗数を満たす特性曲線式を得る。特性曲線式を数値的に解き、非定常流況下での物理量を求める。特性曲線式を(1d)～(1g)に示す。

$$C^+ \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| + \alpha = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{cases} \quad (1d) \quad (1e)$$

$$C^- \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| + \alpha = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{cases} \quad (1f) \quad (1g)$$

実測により取得した地震動加速度を時系列の入力データとして、式(1d)～(1g)を数値的に解くことで地震時動水圧に伴うピエゾ水頭の変動を求める。管軸方向の情報は、対象管水路の図面より得る。数値解を求める解析条件として、時間ステップは0.0005 sとする。空間ステップは、対象管水路の各位置における圧力伝播速度と時間ステップの関係からクーラン数が1となるように設定する。本計算での数値シミュレーションでは、水圧変動の実測値を再現するために、摩擦損失係数についてはマニング式より求めた値に30を乗じた値を与えている。これにより水圧変動の減衰の再現を試みている。

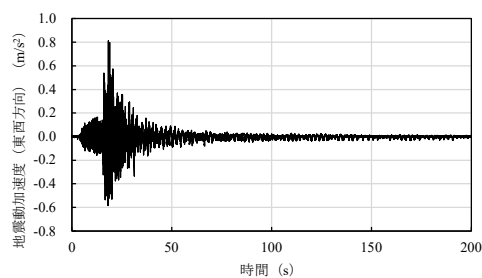
4. 結果および考察

(1) 地震時動水圧の計測結果と数値シミュレーション

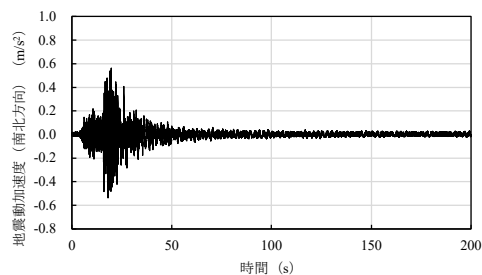
常時計測により取得された地震動加速度を図-5に示す。一例として、2016年1月14日に浦河沖で発生したマグニチュード6.7の地震動による計測結果を表している。図-5(a)～(c)に地震動加速度の3成分の実測値を示す。図-5(d)に実測値3成分より求めた、計測位置直下の本管の管軸に沿った地震動加速度の管軸方向成分の計算値を示す。地震動加速度に伴う地震時動水圧と本計算条件での数値シミュレーション結果を図-6に示す。図-5および図-6の実測値データには0.1 Hzハイパス処理を行っている。数値シミュレーションでは、計測管水路システムの本管だけを対象に、上流のファームpondから下流まで管軸方向の1次元でモデル化している。図-5(d)の管軸方向成分の地震動加速度をもとに、ピエゾ水頭の変動が計算されている。図-6における比較から、数値シミュレーション結果では、20 s付近の急激なピエゾ水頭の変動の開始、その後のピークおよび減衰について実測値を概ね再現している。ただし、減衰については、摩擦損失係数を増加させた値を与えることにより傾向を再現している。

(2) 考察

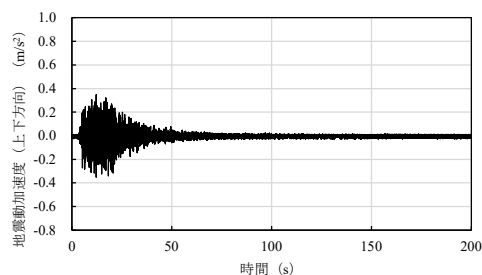
本数値シミュレーションでは、摩擦損失係数を増加させることにより、地震時動水圧の再現を行っている。地震時動水圧による非定常流況におけるエネルギー損失について、定常流況における摩擦損失だけで再現することは困難であると考えられる。既往研究では、管水路の水撃圧現象に伴う非定常流況の数値シミュレーションにおいて、既設管水路での現地試験結果の減衰傾向の合致のために、摩擦損失係数を増加させた値を使用している⁹⁾。この既往研究では、水撃圧現象における流向変化に伴う大きなエネルギー損失の発生が考えられている。非定常流況の圧力変動に対する数値シミュレーションで、定常流況の摩擦項に加えて非定常流況の摩擦項を考慮した数値モデルもある^{9) 10)}。今後は、減衰の影響要因および数



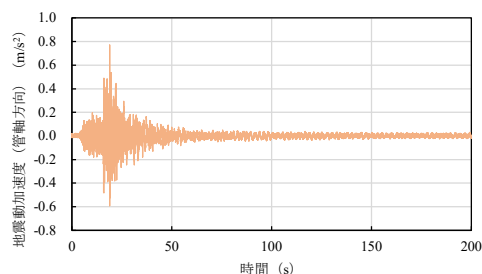
(a) 東西方向成分の実測値



(b) 南北方向成分の実測値



(c) 上下方向成分の実測値



(d) 管軸方向成分の計算値

図-5 地震動加速度の一例

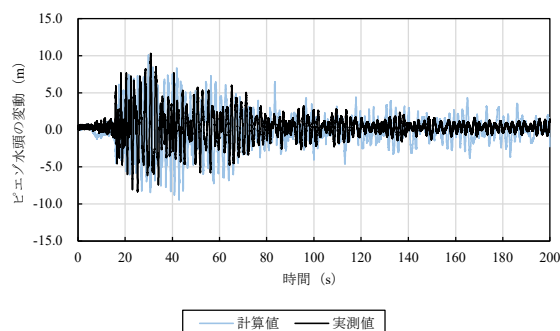


図-6 地震時動水圧の実測値と計算値の比較

値シミュレーションモデルへの反映を検討していく必要がある。

5. おわりに

本研究では、灌漑用管路内にて発生する地震時動水圧を常時計測により検出し、数値シミュレーションによる変動の再現について検討した。水撃現象の計算で用いられる管路内の非定常流況の基礎式に地震動の加速度項を加えた式を特性曲線法により数値的に解き、実測値の再現を試みた。検討の結果、水圧変動の減衰に影響する摩擦損失係数を増加させて計算することで、既設管路における地震時動水圧の実測値を数値シミュレーションにより概ね再現できることが確認された。今後は、減衰の影響を考慮した計算モデルの検討が必要であることが示唆された。

参考文献

- 1) 大久保天, 中村和正, 今泉祐治, 寺田健司, 川口清美: 農業用管路で生じる地震時動水圧, 農業農村工学会論文集, 88 巻 1 号, pp. I_135-I_144, 2020.
- 2) 大久保天, 立石信次, 今泉祐治, 中村和正: 震度 4 の地震動により農業用管路に発生した動水圧, 農業農村工学会論文集, 86 巻 1 号, pp. IV_1-IV_2, 2018.
- 3) 大久保天, 南雲人, 寺田健司: 水田灌漑用管路において発生する地震時動水圧, 寒地土木研究所月報, No. 830, pp. 106-109, 2022.
- 4) 中川義徳: 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, 416, pp. 26-35, 1969.
- 5) 農林水産省農村振興局整備部設計課: 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」基準, 基準の運用, 基準及び運用の解説, 技術書, pp. 221-226, 2009.
- 6) 坂本大樹, 吉村英人, 眞鍋尚, 伊藤俊輔, 佐藤信光: 地震時における管路内動水圧変化の解析 (その 1), 平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp. 634-635, 2018.
- 7) 寺田健司, 南雲人, 大久保天: 特性曲線法を用いた管路に発生する地震時動水圧の一計算手法, 寒地土木研究所月報, No. 815, pp. 34-38, 2022.
- 8) 栗田吉晴, 吉野秀雄, 小林祐一: パイプラインにおける水撃圧解析について一霞ヶ浦用水農業水利事業真壁幹線の事例一, 農業工学研究所技報, 第 195 号, pp. 1-24, 1997.
- 9) 浅田洋平, 木村匡臣, 安瀬地一作, 飯田俊彰, 久保成隆: 管路内のエネルギー減衰を利用した漏水検知法の適用性検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_799-I_804, 2019.
- 10) Asada, Y., Kimura, M., Azschi, I., Iida, T., and Kubo, N.: Leak detection method using energy dissipation model in a pressurized pipeline, Journal of Hydraulic Research, Vol. 59, No. 4, 2021.