

地震時に空気弁内で局所的に生じた水撃圧に関する検討

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 ○寺田 健司
南雲 人
大久保 天

供用中の農業用パイプライン施設において地震時動水圧を観測していたところ、震度3の地震発生に伴い、低圧のパイプラインにおいて水圧が異常に増加する現象を確認した。この値は他の施設で同規模の地震時に記録された地震時動水圧と比較して3～4倍程度の大きさであった。平常時にも本管で水撃圧が発生した際に同様の現象が確認されたことから、吸排気時に空気弁内で局所的に水撃圧が発生していたと考えられた。

キーワード：パイプライン、地震時動水圧、水撃圧

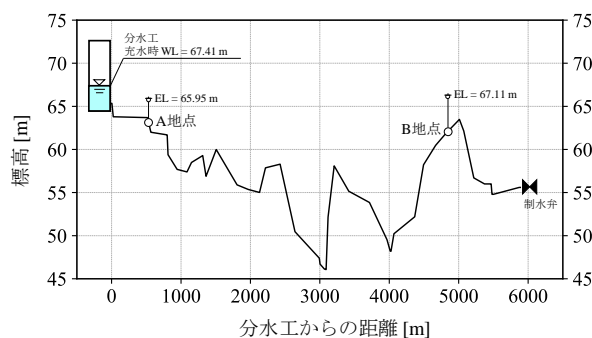
1. はじめに

農業用パイプラインは、営農に必要な不可欠な用水を農地へ供給する役割を担う食料生産基盤のひとつである。近年頻発する大規模な地震に対して、パイプラインに発生する被害の最小化や迅速な復旧に資する対策・基準の策定等は重要な課題となっている。

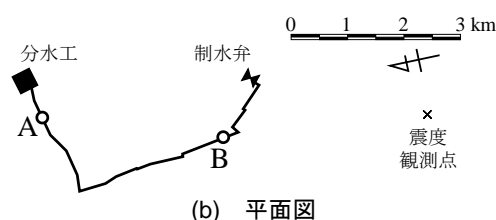
地震時に多く確認されるパイプライン被災のひとつに、空気弁が破損し漏水に至る事例が挙げられる。空気弁とは、管内に連行された空気を排除し通水性能の低下を防止したり、内水圧が低下した際に自動的に空気を吸込むことで管の圧壊を防ぐなどの機能を有する付帯施設である。地震による空気弁の破損部位は内部部品（遊動弁、フロート弁、案内など）の割合が大きい¹⁾ことから、地震時に発生した内水圧の変動（地震時動水圧²⁾）の影響を受けた可能性が高い。このような被災は農業用パイプラインだけではなく水道施設においても確認されている。

既往の研究では、白濱ら³⁾は空気弁の破損原因を検討するため、供用されていた空気弁に対し静的・動的荷重荷試験を実施しており、案内が破損する際の内水圧をおおむね2～3 MPaと推定している。また、既報¹⁾によると2011年東日本大震災での被災事例では、フロート弁が変形していた（静的圧力では9 MPaでも変形しない）ことから、空気弁部で衝撃的な圧力変動が発生したことが示唆されている。玉瀬ら⁴⁾は空気弁部で、吸排気と充水に伴い水撃圧が発生していたことを指摘しており、室内振動台試験により現象を再現している。以上のように地震時に空気弁に生じた水撃圧に関する研究は室内試験や数値計算による検討が多いものの、現場の実測データに関する報告はほとんどない。

本報告では、供用されている低圧の農業用パイプライン



(a) 水利縦断面図



(b) 平面図

図-1 観測対象としたパイプライン

ンで記録された、地震時および平常時に空気弁部で生じた異常な水圧変動記録について報告する。

2. 観測の概要

観測対象としたパイプラインは、国営造成施設直轄管理事業「大夕張地区」において直轄管理されている安平川注水路である。このパイプラインの総延長は5887.8 mであり、全線がφ1100のダクタイル鋳鉄管により建造されている。計画流量は代播期や普通期などにより異なり0.72～0.87 m³/sである。水利縦断面図および平面図を図-1に

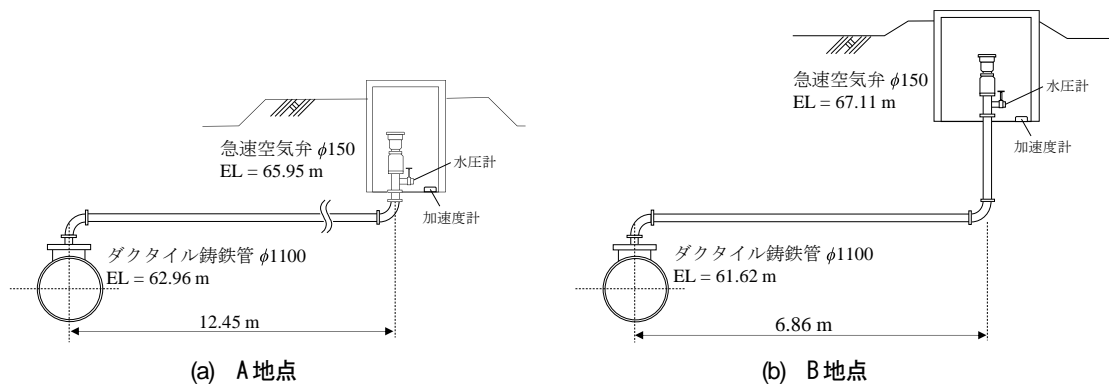


図-2 観測地点の断面図

示す。

観測は2箇所（A地点、B地点）で実施している。空気弁枝管部の先端に水圧計を取付けることで、本管の水圧変動を間接的に観測している。また、地震加速度を計測するため空気弁保護工の底部に加速度計（EW、NS、UD方向）を設置した。サンプリング周波数は100 Hzである。観測地点のパイプライン断面図を図-2に示す。空気弁はいずれもφ150の急速空気弁であり、ダクタイル鋳鉄管φ150により本管直上から離隔をとった位置に配置されている。設計静水圧はA地点で0.06 MPa、B地点では0.08 MPaである。また、設計動水圧はA地点では不明、B地点では約0.02 MPaである。

観測は2019年末から実施しており、近傍の震度観測点で地震が記録された際のデータを確認し、水圧変動が明瞭に記録されているものを抽出した。地震時におけるデータはA、B地点それぞれで13件ずつ観測している（2021年12月時点）。

3. 観測結果

(1) 地震時に記録された水圧変動

図-3に、地震時データ26件に関する、最大地震速度（PGV : Peak Ground Velocity）と水圧変動の最大値（ P_{peak} ）との関係を示す。B地点のプロットで外れ値が出ているが、それ以外のプロットについてはPGVが増加するにつれ P_{peak} も増加しており、概ね比例関係にあることが確認できる。この結果は既往の研究⁵⁾と整合する。震度2以下の地震時データが大半のため厳密な結果とは言えないが、A地点とB地点で生じる地震時動水圧の大きさに大きな違いはない。震度2以下であれば、水圧変動の大きさは±0.02 MPa以下程度であるため、地震時動水圧が設計動水圧を上回り本管が負圧になるような可能性は低いと考えられる。

図-3の外れ値は、2020年3月28日9:57:52浦河沖で発生した震度3（安平町追分柏が丘）の地震時⁶⁾に記録された。同日におけるA、B地点での加速度記録と水圧変動記録を図-4に示す。図-4は上から順に東西方向の加速度、南北方向の加速度、上下方向の加速度、水圧変動である。

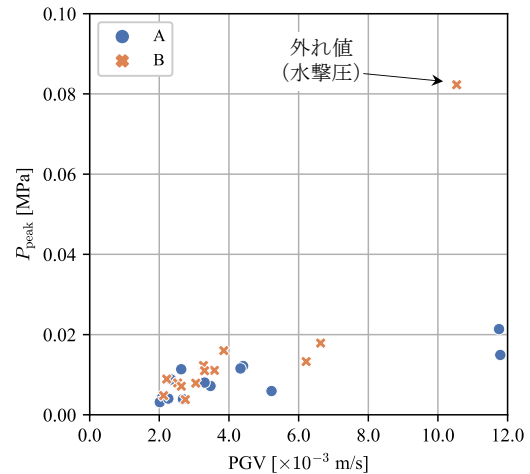


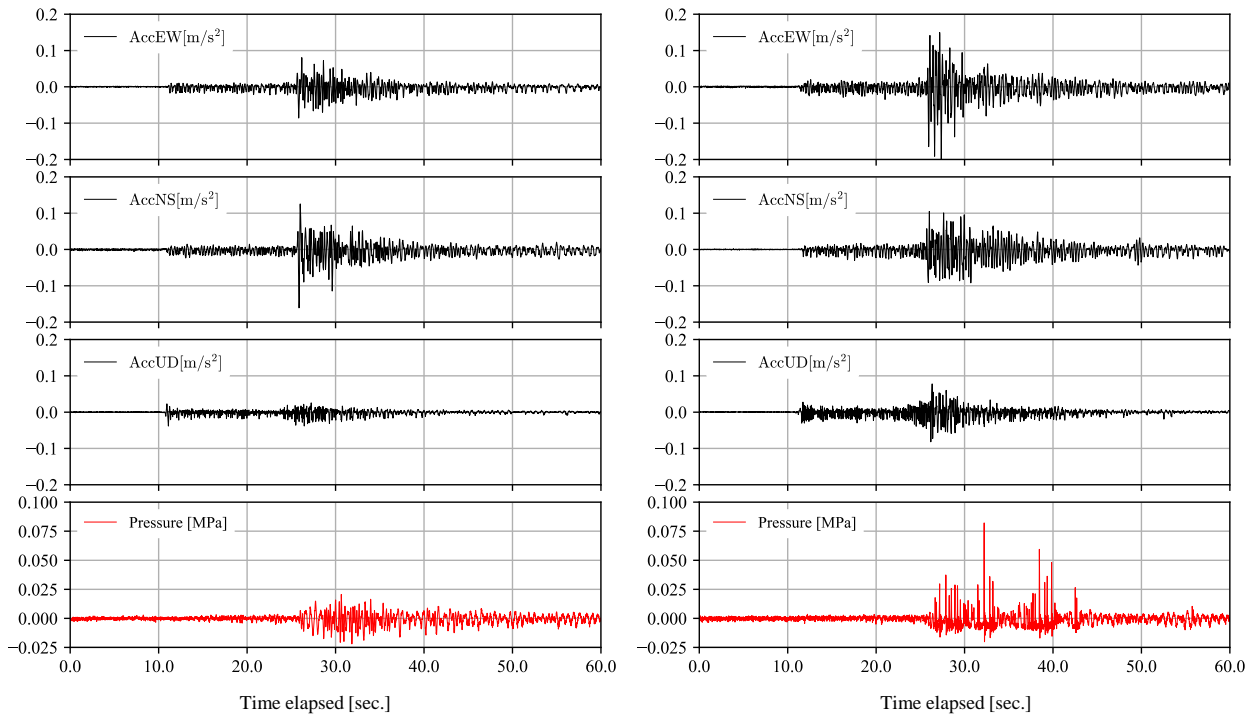
図-3 PGV と水圧変動の最大値 P_{peak} の関係

A地点では、最大振幅0.021 MPaの水圧変動であり、水圧の上昇・下降が同程度の大きさで繰り返し生じている。一方、B地点では水圧の上昇量がA地点と比べて大きく、最大で0.082 MPa上昇している。A地点の水圧変動は周期が約1~2秒の振動であるのに対し、B地点では瞬間的に圧力が増加する現象が繰り返し生じており、2地点で全く異なる現象が記録されている。

(2) 平常時に記録された水圧変動

図-5に、2021年4月30日13時頃に記録された加速度と水圧変動を示す。AとB地点ともに、水圧波形は周期20~30秒、振幅0.03~0.04 MPa程度の水圧変動と、瞬間的な水圧の増加を重ね合わせたような波形が記録されている。水圧変動の最大値はA地点で0.4 MPa、B地点では2.3 MPaと非常に大きい値を示している。周期20~30秒の変動は、長周期であることや制水弁に近いB地点で先に生じていることから、パイプライン末端の制水弁操作に伴い本管に生じた水撃圧であると考えられる。瞬間的な水圧の増加は本管の内水圧が上昇する際に発生する特徴がある。

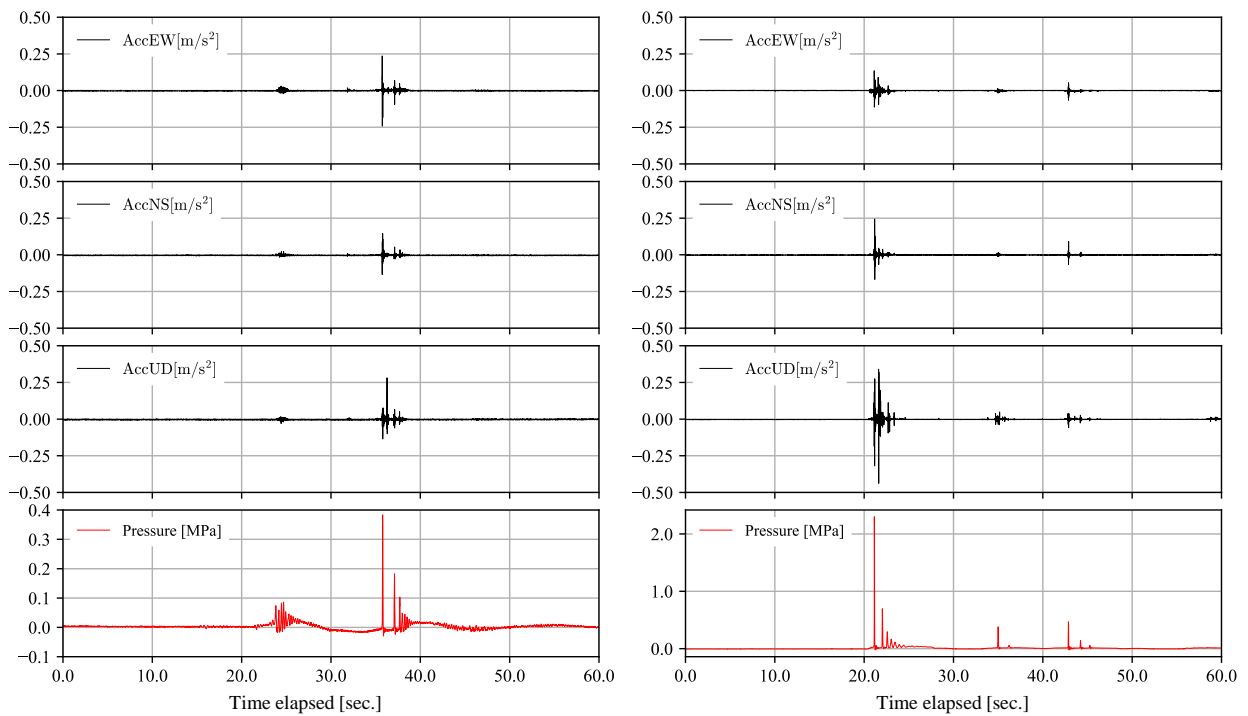
加速度計にも反応が見られるが、同日には近傍で地震は記録されていない。水圧の上昇と同時に加速度計が反応していることから、空気弁とその接続管が水圧により衝撃を受け振動したものと考えられる。



(a) A地点

(b) B地点

図4 地震時に記録された加速度・水圧変動
(2020年3月28日 09:57:32 ~ 09:58:32)



(a) A地点

(b) B地点

図5 平常時に記録された加速度・水圧変動
(2021年4月30日 13:21:17 ~ 13:22:17)

(3) 水圧の異常変動に関する考察

地震時や平常時に関わらず、本管の水圧が変動する際に瞬間的に水圧が上昇する現象が確認された。これは既往の文献等で考察されているように、空気弁の吸排気動作に伴い、水撃現象が生じたためであると考えられる⁴⁾。図-6に示す通り地震時動水圧や水撃圧が発生し、水圧が減少し負圧となった際に、空気弁のフロート弁が下降し吸気される。そして水圧が上昇する際には、空気弁が充水され水位が上昇し、空気弁内の空気が排気される。充水時には、空気弁内を水で満たすように水位上昇、つまり上向きの流速が生じている（以下、この空気弁を充水する際の流速のことを充水速度と呼ぶ）。水位上昇に伴いフロート弁が上昇し通気口を塞ぐことで、充水速度が瞬間的に0になるため、バルブの急閉塞と類似した現象が起り、空気弁部で局所的に水撃圧が生じたものと考えられる。

空気弁で発生する水撃圧により、空気弁と接続管が衝撃を受け振動していたことが加速度計の記録から明らかとなった。地震時の記録でも地震加速度だけではなく管体の振動を記録したような波形が確認された。2018年胆振東部地震では、空気弁接続管部の曲がり部付近で漏水している事例が複数確認されている⁷⁾。地震時に空気弁で局所的かつ繰り返し発生した水撃圧が、スラスト力として曲がり部に力学的な影響を与えたことが、被災の一因になっていたと考えられる。

上述した水圧変動のメカニズムは、標高が高く、つまり静水圧・動水圧が小さく負圧状態となりやすい位置に設置された空気弁で発生しやすいと考えられる。A、B地点で生じた水圧変動を比較すると、地震時・平常時の観測記録についても、B地点で大きな水圧が発生しており、図-2に示す通りB地点の空気弁標高は高い。また、B地点は末端の制水弁に近いため、通水時には動水位が低いことや、本管の水撃圧による水圧変動の影響をより受けやすい位置にあったことも一因であると考えられる。

農業用パイプライン設計基準技術書⁸⁾において、動水圧の検討では本管が負圧とならないよう、管頂の標高と動水位線までの余裕水頭はいかなる流量時においても0.5 m (0.0049 MPa) 以上確保することが望ましいとされている。このような余裕水頭が小さい地点で、空気弁が設置されており、かつ空気弁と本管の標高差が大きい場合、本管では設計通りの水圧状態となっている場合でも、空気弁部では負圧に近い状態になると考えられるため、設計水圧だけではなく空気弁の設置高さにも留意が必要であると考えられる。

(4) 空気弁で発生した水撃圧が本管に与える影響

空気弁地点で発生した水撃圧は、分岐管を通じて本管へと伝播すると考えられる。一般に管内のある地点から分岐点へと進行する波 (F_1) は図-7に示すように、分岐点において一部が反射 ($r_{b1}F_1$) し、一部が分岐先へと通

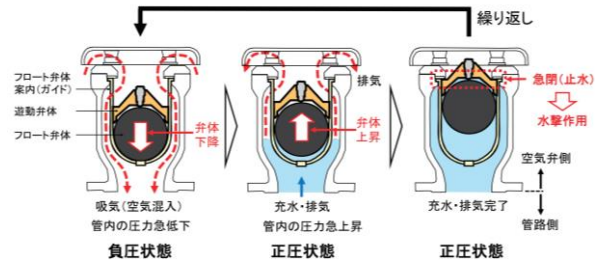


図-6 空気弁の動作と水撃作用
(既報⁴⁾より転記)

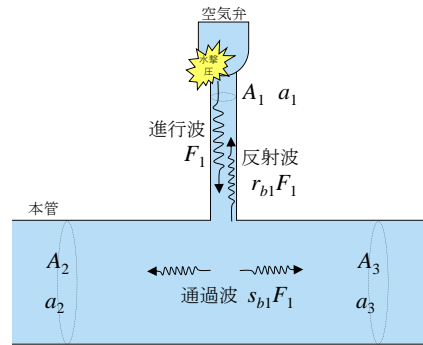


図-7 空気弁で生じた水撃圧の伝播

表-1 反射係数および通過係数の計算結果

| | 分岐管 | 本管 |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| A [m ²] | 0.0177 | 0.950 |
| E [kN/m ²] | 160×10^6 | 160×10^6 |
| D/t | 20.0 | 61.1 |
| a [m/s] | 1274 | 1071 |
| r_{b1} | | -0.984 |
| s_{b1} | | 0.016 |

過 ($s_{b1}F_1$) する⁹⁾。 r_{b1} 、 s_{b1} はそれぞれ反射係数、通過係数と呼び、以下の式により求める。

$$r_{b1} = \frac{\frac{A_1}{a_1} - \frac{A_2}{a_2} - \frac{A_3}{a_3}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad (1)$$

$$s_{b1} = \frac{2 \frac{A_1}{a_1}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad (2)$$

ここに、 A_i は管路 i の断面積、 a_i は管路 i の圧力伝播速度である。圧力伝播速度は以下の式により求められる⁹⁾。

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho_w \left(\frac{1}{K} + \frac{DC_1}{Et} \right)}} \quad (3)$$

ここに、 ρ_w は水の密度(=997.0 kg/m³)、 K は水の体積弾性係数(=2.03×10⁶ kN/m²)、 D は管の内径(m)、 E は管材のヤング係数(kN/m²)、 t は管厚(m)、 C_1 は埋設状況による係数

(1.0を基準とする)である。

観測地点A、Bのパラメータとして、表-1を設定し反射係数および通過係数を算出した。ここでは管1を分岐管(空気弁)、管2,3を本管としている。また、 $A_2=A_3$ 、 $a_2=a_3$ として計算した。計算の結果、反射係数 r_{b1} が-0.984、通過係数 s_{b1} が0.016となることから、空気弁で発生した圧力波の大半は分岐管へ反射しており、本管に与える影響は1.6%程度と小さいことがわかった。しかしながら、観測記録で最大の大きさの水撃圧は2.3 MPaであり(図-5)、通過係数を乗じた値である約0.037 MPaの水圧が本管へ伝播していた可能性がある。この値は設計動水圧を上回っている。このことから、特に低圧パイプラインに対しては、制水弁等を操作し流量を大きく変更する場合は、水撃圧の発生を抑えるように留意する必要がある。

4. おわりに

本研究では、低圧パイプラインの空気弁地点で水圧と加速度を常時観測していた際に記録された水圧の異常変動について報告した。得られた知見を以下に挙げる。

- 本管の水圧が変動する際に、空気弁内で水撃現象が発生し強い水撃圧が発生する現象が確認された。本管の水圧変動とは、制水弁の操作等に伴い発生する水撃圧や地震時動水圧などが該当する。また加速度計の記録から、空気弁で発生した水撃圧により接続管が衝撃を受け振動していたことが確認された。
- 空気弁で発生する水撃圧は、標高が高く水圧が小さい位置に配置された空気弁で発生する可能性が高く、強い水撃圧が発生する傾向がある。
- 観測地点A、Bのように、本管の内径に対して接続管の内径が小さい場合、通過係数の値は十分小さくなるため、空気弁で発生した水撃圧が本管へ伝播する割合は小さいと考えられる。

謝辞：本観測機器の設置や観測に際し多大なご協力を賜りました、札幌開発建設部の関係機関の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本水道協会(2012)：平成23年(2011年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書、pp.109-126.
- 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、416、pp.26-35.
- 3) 白濱 富久男、井原 和彦、藤澤 豊、田中 良和、有吉 充(2021)：熊本地震において空気弁が破損に至る空気弁内圧力の推定、水土の知、89(10)、pp.759-763.
- 4) 玉瀬 充康、宮島 昌克(2018)：地震時の管内水圧変化に伴う空気弁の被害分析と実験による管内水圧挙動の検証、地域安全学会論文集、33、pp.267-274.
- 5) 大久保 天、中村 和正、今泉 祐治、寺田 健司、川口 清美(2020)：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、310(88-1)、pp.L135-L144.
- 6) 気象庁、震度データベース検索(オンライン)、<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html#20200328095751>、参照2022-01-08.
- 7) 佐々木 友也、林 寿範、蒔苗 英孝(2018)：北海道胆振東部地震に伴う道央注水工及び安平川注水路の漏水事故対応一調査・復旧・安全確認一、第62回(2018年度)北海道開発技術研究発表会.
- 8) 農林水産省農村振興局整備部設計課(2021)：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、pp.135-273.
- 9) 秋元 徳三(1977)：水撃作用と圧力脈動 <増補版>、日本工業新聞社、pp.38-72.