

## 農業用パイプラインの水撃圧について

農業土木研究室

**Q 1 : パイプラインの水撃圧って何ですか。その大きさは、どんな事柄と関係がありますか？**

**A 1 :** バルブの操作やポンプの起動・停止によりパイプライン内の水の流速が変化すると、管内の圧力が変化し、この圧力変化が波動となって管内を往復します。これが水撃圧です。

図-1のような簡単なパイプラインの例で説明しましょう。図中でLは管長、aは水撃圧の伝播速度、tは時刻、Vは流速、 $V_0$ は初期の流速、 $\epsilon$ は微小時間です。末端のバルブが開いており、水が流れていると考えて下さい (a)。まず、この状態からバルブを急に閉じると、バルブを通過する流量が減少し、ほぼ同時にバルブの直上流部の流速が低下します。ところが、管内の流速全てがすぐに低下するわけでないで、バルブ直上流の水は、後ろからくる水で圧縮されることになり、圧力が上昇します (b)。このような圧力上昇部分は上流へ向かって波となって伝わり、水槽に到達し (c)、次に圧力が初期状態に戻った部分が、下流に向かって伸びてバルブに到達します (e)。そして今度はバルブ付近から圧力低下が始まり (f)、これが上流に伝わっていきます (g)。このような圧力の伝播は、減衰を伴いながら、しばらく続きます。水撃圧はバルブの流量の減少時ばかりでなく増加時にも生じます。ただし、この場合はバルブ付近の圧力の低下から現象が始まります。

水撃圧の大小は、管路長、管径、管の材質や管厚、流量変化量、バルブの型式や開閉操作の速さ、ポンプの運転方法などで決まります。管の材質、形状、延長などが与えられた場合には、バルブの操作やポンプの運転方法が水撃圧を決めることになります。

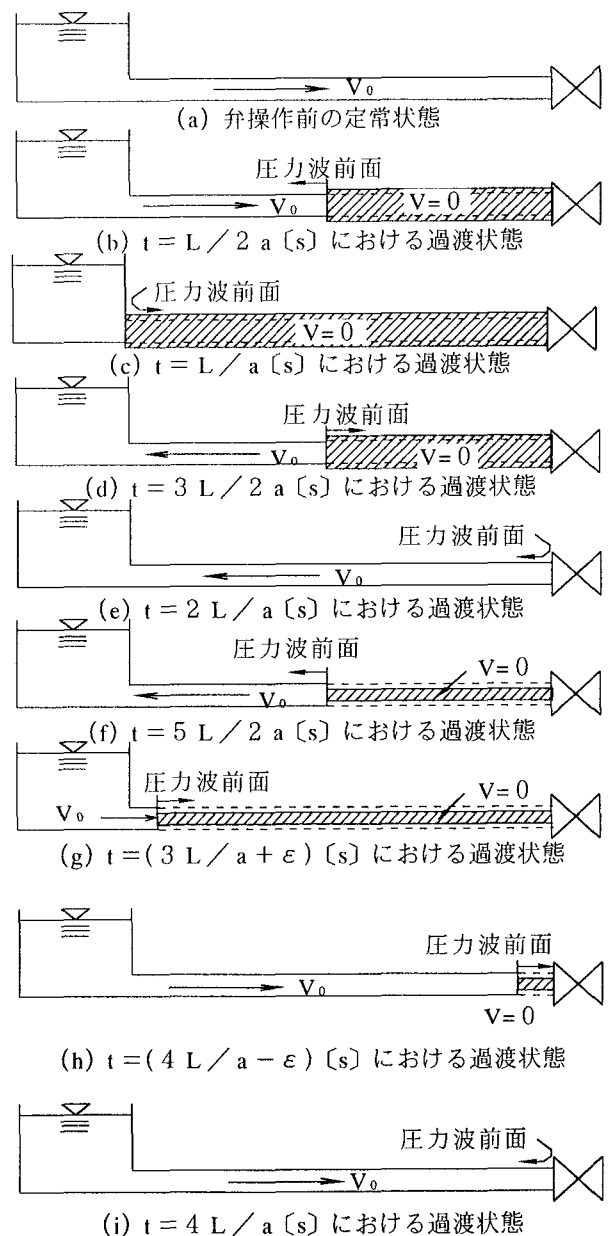


図-1 水撃圧

**Q 2 : バルブの急閉そく、緩閉そくとは何ですか。水撃圧の大きさと、どう関係があるのでしょうか？**

A 2 : 文字どおり、バルブをすばやく閉じる場合を急閉そく、ゆっくり閉じる場合を緩閉そくといいます。このとき、バルブの閉そく開始とともに発生した圧力波が、パイプラインの上流で折り返し、再びバルブにもどってくるまでにバルブ操作を終了している場合を急閉そく、それ以外を緩閉そくと呼びます。急閉そくと緩閉そくでは、水理的現象が異なるため、水撃圧の推定式が異なります。前者に対してはジュコフスキーの式が、後者に対してはアリエビの式が用いられます。これらの式の詳細は、他の参考書<sup>2)</sup>をごらん下さい。

容易に想像できるように、バルブの閉そく時間が短ければ、水撃圧は大きくなります。ために、バルブの操作時間と水撃圧の関係をパソコンで計算してみましょう。

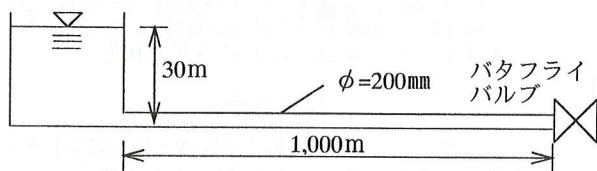


図-2 計算に用いたモデル

図-2のような簡単なパイプラインで、流速1.87m/sになるようにバタフライバルブを開いた状態から、バルブを閉じていくものとします。計算は、中心差分法という方法<sup>3)</sup>を用いています。また、バタフライバルブの開度と損失係数の関係すなわちバルブの特性は図-3とします。

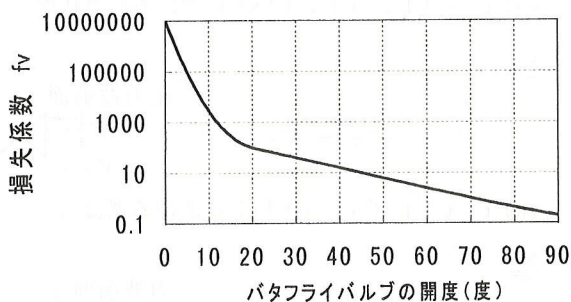


図-3 計算に用いたバタフライバルブの特性

それから、管の内面の滑らかさや管の硬さも重要な因子ですから、これらの因子を表現する値として流速係数Cを150、水撃波の伝播速度aを500m/sとしておきます。これはプラスチック系

の管の値を想定したものです。

5通りの閉そく時間に対して得られた計算結果が図-4です。3秒で閉そくした場合には、静水圧(30m=3kgf/cm<sup>2</sup>)に約9kgf/cm<sup>2</sup>の水撃圧が加わっています。20秒で閉そくした場合には、これに比べて2kgf/cm<sup>2</sup>程度の水撃圧でおさまっています。なお、この図で動水位が負になっている部分がありますが、実際には動水位が負になることはありません。ただし、この場合には管内の圧が0に近くなるとともに、空気弁からの空気の侵入や水中に溶けていた空気が気体となって分離する水柱分離、さらには管の圧潰の危険性が生じます。

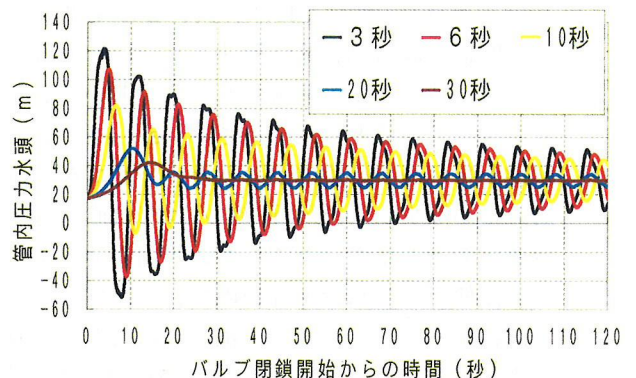


図-4 閉そく時間と管内圧力変化 (a=500m/s、C=150)

ところで、バルブの操作が急閉そくか緩閉そくかを区分するうえで、1つ注意点があります。たとえ話で説明しましょう。いま、全閉の状態から全開するのにハンドルが2回転するような水道のコックを想像して下さい。全閉からハンドルを1回転開いた状態の流量は、全開のときの流量の半分だということは決してありません。むしろ、全開時に近い流量であることが多いと思います。このようなコックでは、全開から全閉までを10秒かけて操作したとしても、実際に流量が絞られ始めてから0になるまでの時間は、10秒よりもずっと短くなります。農業用パイプラインのバルブ類でも同様の効果がみられます。この現象を考慮したバルブ操作時間を等価操作時間と呼び、バルブの急閉そく、緩閉そくを論じる場合には、この等価閉そく時間を用いることが必要です。等価閉そく時間の求め方は、他の参考書<sup>2)</sup>をご覧ください。

ちなみに、図-4の計算事例の5通りの閉そく

時間に対し、等価閉そく時間は、それぞれ1.9秒、3.8秒、6.4秒、13秒、19秒です。また、管長 $L=1000\text{m}$ 、水撃圧の伝播速度  $a=500\text{m/s}$  ですから

$2L/a=4$  秒が急閉そくと緩閉そくの境になり、5通りのうち2通りが急閉そくにあたります。

**Q3：管の材質で水撃圧はどう異なるのですか？**

**A3：**管の材質の特性のうち水理現象に影響するものとして、管の内面の滑らかさと、管の変形性があげられます。まず、管の滑らかさは流速係数 $C$ で表現でき、摩擦損失水頭に影響します。また、管の変形性は水撃圧の伝播速度  $a$  と関係しています。管が変形しにくく、通水断面が膨張しにくいものほど、伝播速度は大きくなります。つまり、管の素材のもつヤング係数や、管厚と管径の比が大きいものほど、伝播速度は速くなります。

$a$  と  $C$  のうち、水撃圧の大きさに大きな影響を与えるのは前者です。管種ごとの伝播速度は、鋼管 $1000\text{m/s}$ 前後、ダクタイル鋳鉄管 $1200\text{m/s}$ 前後、塩ビ管 $500\text{m/s}$ といわれています<sup>3) 4)</sup>。なお、これらはあくまでも目安であり、管の厚さなどによって異なります。

圧力波の伝播速度は管の内径、厚さ、管材のヤング係数からも計算できます。しかし、計算値 $381\text{m/s}$ に対し実測値が $427\text{m/s}$ であるというように両者が一致しない事例も報告されています<sup>1)</sup>。

ここで再びパソコンの力を借りて、管種と水撃圧の関係について計算例を示してみましよう。パイプラインの長さや径は図-2と同じとし、管の材質として表-1のように  $a$ 、 $C$  の組合せを4通り考えています。

表-1

	$a(\text{m/s})$	$C$
①	300	150
②	500	150
③	700	150
④	1200	130

④の  $a=1200\text{m/s}$ 、 $C=130$ の組合せはダクタイル鋳鉄管に近い値です。①②③は、プラスチック系の管を想定していますが、伝播速度の影響を見るために  $a$  は300、500、700 $\text{m/s}$ の3通りをと

ることにします。いずれの管でも流速 $1.87\text{m/s}$ の状態から、バタフライバルブを閉じていくこととして計算しました。

図-5は30秒かけてバルブを閉じた場合のバルブ直上流での圧力の経過です。すべて緩閉そくにあたります。バルブを閉じていく間には、 $1.2\sim 1.4\text{kgf/cm}^2$ の圧力上昇が見られますが、管種による差は大きくありません。柔らかい管は、圧力変化を吸収するような先入観がありますが、この図では、むしろ最も  $a$  の小さな場合に水撃圧が大きくなっています。

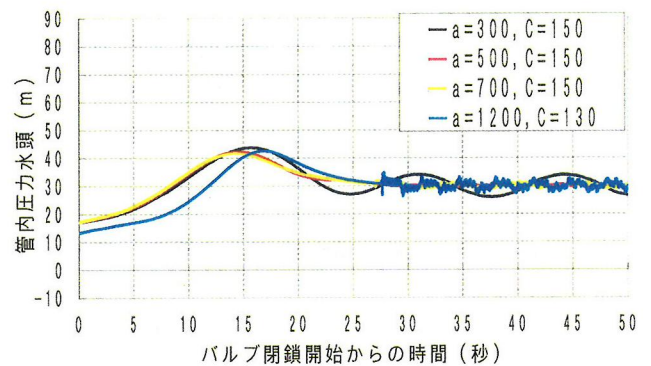


図-5 30秒で全閉した時の管内圧力変化

ここでは計算例を示しませんが、急閉そくの場合には、図-5に比べてはるかに大きな水撃圧が生じます。この場合には硬い管、すなわち  $a$  の大きな管ほど高い水撃圧が生じます。

ところで、当然ながら  $a$  の小さい管では、水撃圧が管を往復する時間が長いぶんだけ時間をかけてバルブを閉じないと急閉そくになり易いということがあります。このことは、バルブの操作を考える上で、心に留めておく必要があります。

Q 4 : 水撃圧の経験則って何ですか？

A 4 : 経験則とは、農業用パイプラインの過去の設計事例や施工事例などから経験的に水撃圧をとりまとめたもので、自然圧送方式あるいはポンプのあるパイプラインといった形式分類ごとに水撃圧が示されています。例えば、図-2のような自然圧送方式のクローズドタイプパイプラインであれば、「静水圧が3.5kgf/cm<sup>2</sup>未満の場合は静水圧の100%とする。静水圧が3.5kgf/cm<sup>2</sup>以上の場合は静水圧の40%、または3.5kgf/cm<sup>2</sup>のうち大きい値とする。」と記されています<sup>2)</sup>。

ところで、本稿で述べてきたように、水撃圧の大きさは、管路の形状、延長、材質やバルブの操作によって決まります。それゆえ、与えられた形式のパイプラインに対して、いかなる場合でも水撃圧が経験則の範囲内におさまる保証はありません。経験則は、オールマイティーな値ではなく、一応の目安であると考えべきものです。それゆえ、「水撃圧の予測は、経験則による方法を原則とする。ただし、経験則の範囲に収めるための手段が明確に示されなければならないので、計算等による方法でもその予測を行わなくてはならない。」とされています<sup>2)</sup>。また、以下のパイプライン組織は原則的に数値解析法による確認が必要とされています。

- ①クローズドタイプのパイプライン
- ②揚水ポンプ（規模比較的大きい）～管路～水槽系のパイプライン
- ③水槽～管路～弁（減圧バルブや流量調節バルブ）系のパイプライン
- ④圧送ポンプ（規模比較的大きい）～管路～バルブ系のパイプライン
- ⑤圧送ポンプ～増圧ポンプ（ブースタ）～管路～バルブ系のパイプライン

この時、計算値と経験則による値の取扱いは、以下のようになっています。

- ①計算による方法が、経験則の値を下回った場合には、経験則の値を使用する。
- ②計算による方法が経験則の値を上回る場合には、パイプラインや弁の操作において軽減策を講じて、計算値が経験則の値より小さくな

るようにする。

- ③軽減策を講じても計算値が経験則よりも大きい場合には計算値を採用する。

このように、経験則による値はあくまでも目安であって、計算による確認が前提となっていることは、大いに注意が必要です。設計者側からいえば「末端の細いパイプラインまで計算しなきゃならないのなら、えらく手間がかかるよ」という声が聞こえそうです。しかし、筆者は末端にこそ不確定要素がたくさんあると思います。農家の操作する末端のバルブには、各種の型式のものがありますし、農家にはバルブをゆっくり操作するように説明しておいても、それがいつも守られる保証はありません。それゆえ、何らかの計算による確認が必要だと感じています。筆者は、設計の実務上の手間も省きながら、計算による確認も行うために、次のような調査研究が必要だと考えています。まず、北海道のパイプラインの計画例を収集し、末端の管路の共通点を整理し、「よくある末端配管パターン」を決めます。次に、このパターンをカバーできるように管種、管路延長、流速範囲、バルブ型式と操作を条件決定して水撃圧を計算し、経験則の値以下に抑えるための必要事項を整理します。残念ながら、この作業は現在進行中なので、ここで条件を示すことはできませんが、近いうちに答えを出す予定でおります。

(文責 中村和正、土肥論志)

参考文献および参照URL

- 1) 小堀・横山訳パーマキアン：水撃解析法，p30～31，コロナ社(1974)
- 2) 農林水産省構造改善局：土地改良設計計画基準・設計「パイプライン」基準書・技術書(1998)
- 3) 吉野秀雄、栗田吉晴：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(1996)
- 4) <http://www.plexco.comx/pdf/awwa-3.pdf>  
(Comparative Analysis: Water Hammer Events in PLEXCO High Density Polyethylene(HDPE) versus Polyvinyl Chloride(PVC) and Ductile Iron(DI))