

緩閉鎖による水撃圧の動的管破壊について

Dynamic pipe fracture by waterhammer of gradual valve closure

河野幸夫* 佐藤清彦** 佐藤裕久*** 渡辺雅二****

By Yukio KONO, Kiyohiko SATO, Yasuhisa SATO and Masaji WATANABE

The waterhammer which occurred in the water distribution pipeline system was analyzed by the method of characteristics. The result of the analysis shows the variety of pressure loading time because of differences of gradual valve closing time. The elastic plastic analysis concerning with the dynamic characteristics of PVC pipe material was applied to find the area of quasi-static zone and dynamic zone. Finally the results of waterhammer analysis were classified to quasi-static zone or dynamic zone by the results of pipe fracture study.

Keywords : waterhammer, pipe fracture, MOC, FEM, dynamic characteristics of PVC pipe

1. はじめに

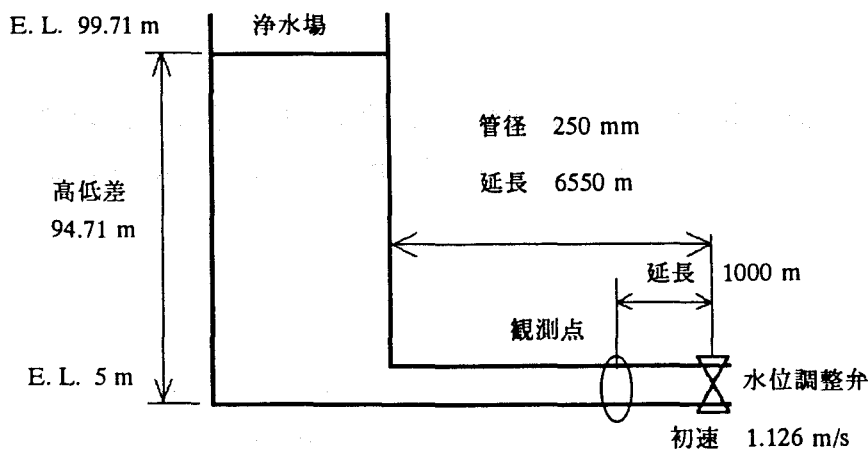
水撃圧に関する分野における最近の研究傾向として、水撃圧の水理学的特質の解析と同時に、管への作用に関しての構造力学とのインターアクションの研究が少しずつ増えてきた。また、水理学的分野と構造力学的分野とのインターアクションとしては水撃圧による管の振動やサポートの振動に関する研究があるが、本研究の目的である水撃圧による管の破壊に関しては未解明な点が多い。

水撃圧による上水道管路等の管破壊事故¹⁾は、水撃圧による管への载荷時間が問題となる。弁がある程度ゆっくりと閉塞する場合、水撃圧も弁のゆっくりした閉塞につれて徐々に圧力上昇をもたらす。

しかし、水撃圧による管路への载荷は、管材の動的特性が影響をおよぼす動的载荷範囲か、または準静的特性の準静的载荷範囲なのか、明らかでない。よって、本研究では準静的解析および管材の動的特性を考慮した弾塑性解析と、これまでの実験データ²⁾より動的範囲と準静的範囲とを明らかにし、この上水道管路で発生する水撃圧がどの領域に入るかの検討を行う。

2. 上水道システムのモデル化と水撃解析

-
- | | | | | | |
|------|-----|-----|-----------|--------------|---------------------|
| * | 正会員 | 工博 | 東北学院大学助教授 | 工学部土木工学科 | (〒985 多賀城市中央1-13-1) |
| ** | 学生員 | | 東北学院大学大学院 | 工学研究科土木工学科専攻 | |
| *** | | 工博 | 東北学院大学教授 | 工学部機械工学科 | |
| **** | | PhD | 岡山大学 教授 | 環境理工学部環境数理学科 | (〒700 岡山市津島中1-1-1) |



図－2.1 上水道の簡単なモデル

S市の上水道システムの一配水系統で水位調整弁の閉鎖により、水撃圧が発生し、管破壊事故を起こす地帯があり、現地実験と水撃解析を行った。

2.1 水撃波伝播速度

水撃圧の伝播速度は液体の単相においては配管の管の材質と管路の固定条件などによって決定され、その伝播速度は定数として取り扱われる。この上水道システムは水道用鋳鉄管で出来ている。水撃波の伝播速度 a は境界条件が管路の両端固定における薄肉管の式を用いる。

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)(1 - \mu^2)}} \quad (2.1)$$

ここで、 D ：管の内径 250 mm、 e ：管の肉厚 7.5 mm、 K ：水の弾性係数 $2.07 \times 10^8 \text{ kgf/m}^2$ (2.03 GPa)、 ρ ：水の密度 $101.97 \text{ kgf s}^2/\text{m}^4$ (1000 kg/m^3)、 E ：管の弾性係数 $1.687 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$ (165 GPa)、 μ ：ポアソン比 0.3 の値を (2.1) 式に代入すると伝播速度 a は 1214 m/s となる。

2.2 水撃圧の解析

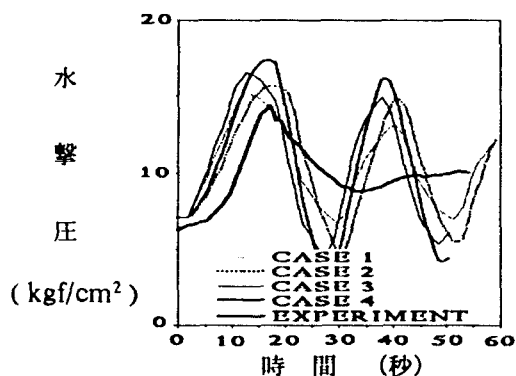
水撃圧の理論は一般的に一次元非定常流として取り扱われ、運動方程式は (2.2) 式で、連続方程式は (2.3) 式で表される。

$$\frac{\partial V}{\partial x} V + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V^2 = 0 \quad (2.2)$$

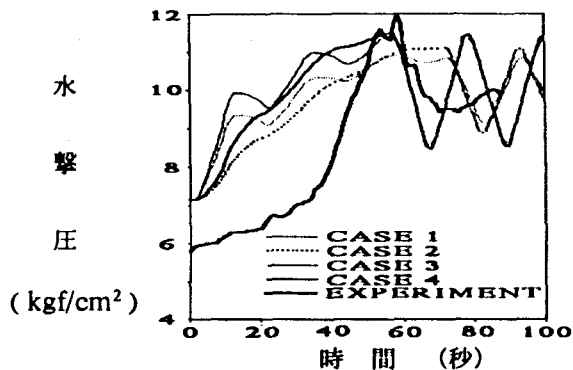
$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} V + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial x} V = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 V は流速、 H は水頭、 t は時間、 x は x 軸、 z は位置水頭、 f は摩擦損失係数、 g は重力の加速度である。(2.2) 式と (2.3) 式の線形結合より、特性曲線法によって数値解析される。

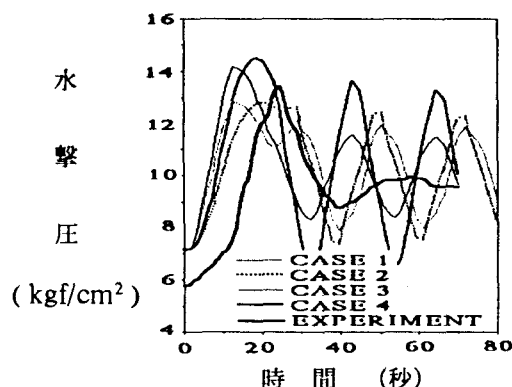
ここでの主な仮定は、この上水道の配管の途中よりの給水または漏水が無いものとする事で解



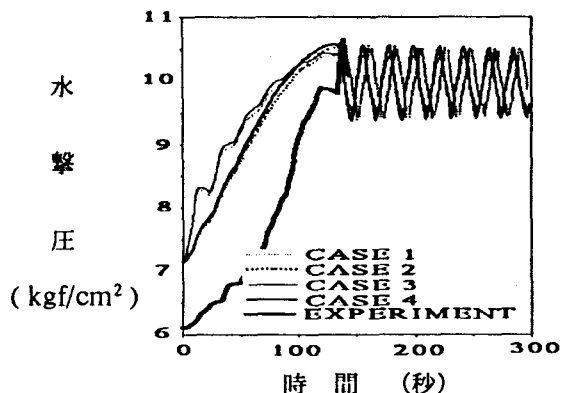
(1) 開度 2.0 (载荷時間 12.7 - 17.1 秒)



(3) 開度 1.0 (载荷時間 56.9 - 57.5 秒)



(2) 開度 1.5 (载荷時間 18.9 - 22.0 秒)



(4) 開度 5 (载荷時間 135 - 140 秒)

図一 2.2 水撃解析結果と実験値 (ニードル開度と载荷時間)

析されるのであるが、実際には配管の途中よりの給水または漏水が有り、実際の上水道の配管をそのままコンピュータに導入すると不自然な実際の水撃波とは異なる結果となり、ここでは、図一 2.1 のようなむしろ簡単なモデルによって解析され、良い結果が得られた。

ここで行われた解析は特に水位調整弁の形状によって発生する水撃圧が異なることより、下流端の境界条件を、弁の形状を直線弁と仮定した L V モデル (Linear Valve Model)、スルース弁と仮定した S V モデル (Sluice Valve Model)、および、弁の閉鎖時間を実際に観測した時間を使用した場合 (T C : Closing Time) と、実験結果より実際に水撃波が上昇し始めた時からピークまでの時間を閉鎖時間とした場合 (T C E : Closing Time of Experiment) の組み合わせの 4 ケースについて解析がなされた。つまり、ケース 1 は T C 時間と L V モデルの組み合わせ、ケース 2 は T C 時間と S V モデルの組み合わせ、ケース 3 は T C E 時間と L V モデルの組み合わせ、ケース 4 は T C E 時間と S V モデルの組み合わせ、の 4 ケースについて解析が行われた。

2.3 水撃解析結果

図一 2.2 は水撃解析結果と実験値でニードル開度と载荷時間を示し、(1) はニードル開度が 2.0 の場合の解析結果で実験値と比較出来る。水撃圧の最大値はケース 4 の場合で、17.1 秒後に 17.39 kgf/cm² (1.71x10⁶ Pa) となった。最小値はケース 1 の場合で、12.6 秒後に 15.15 kgf/cm² (1.49x10⁶ Pa) となり、この値が実験値 14.83 kgf/cm² (1.45x10⁶ Pa) に最も近かった。

(2) はニードル開度が 1.5 の場合の解析結果と実験値である。水撃圧の最大値はこの場合にお

いても同様にケース4の場合で、18.9秒後に 14.51 kgf/cm^2 ($1.42 \times 10^6 \text{ Pa}$)となった。最小値もケース1の場合であるが、実験値 13.75 kgf/cm^2 ($1.35 \times 10^6 \text{ Pa}$)はケース2とケース3の中間の値となった。

(3)はニードル開度が10の場合の解析結果と実験値である。水撃圧の最大値はこの場合、実験値 11.51 kgf/cm^2 ($1.13 \times 10^6 \text{ Pa}$)の56.9秒後であり、解析結果の最大値はこの場合においても同様にケース4の場合で、57.5秒後に 11.40 kgf/cm^2 ($1.12 \times 10^6 \text{ Pa}$)となった。最小値も前回と同様にケース1の場合である。

(4)はニードル開度が5の場合の解析結果と実験値である。水撃圧の最大値はこの場合、実験値 10.92 kgf/cm^2 ($1.07 \times 10^6 \text{ Pa}$)の134.8秒後であり、解析結果の最大値はこの場合においても同様にケース4の場合で、134.7秒後に 10.57 kgf/cm^2 ($1.04 \times 10^6 \text{ Pa}$)となった。最小値も前回と同様にケース1の場合で、140.1秒後に 10.43 kgf/cm^2 ($1.02 \times 10^6 \text{ Pa}$)となった。

3. 管材の動的特性を考慮した弾塑性解析

管材への水撃圧载荷には、载荷時間により準静的、動的の2つの範囲に分けられ、動的範囲の解析では、慣性項と管の試験速度依存特性の二つを考慮する必要がある。

慣性項は無視できるが、管材料の試験速度依存特性は無視できない動的範囲が存在し、ここでは、管材料の動的特性を考慮した弾塑性解析と準静的領域における解析法を明らかにし、その結果、準静的領域と動的領域の境界を水圧载荷時間によって示すことである。

3.1 準静的応力解析と管材料の動的特性を考慮した弾塑性解析

管に水圧が作用している場合について弾塑性解析を行なうため、管路軸直角方向の断面を対象とした平面ひずみ状態、6節点線形ひずみ三角形要素について有限要素法を用いた。三角形要素の内部仮想仕事は仮想ひずみと応力をかけ、要素全体を積分することによって得られる。また、外部仮想仕事は仮想変位と節点に作用する外力の積により求められる。そして、内部仮想仕事と外部仮想仕事は等しいと置く。求められた力と変位の方程式に境界条件を入れて解くと、未知接点変位と未知反力が求まる。応力は各三角形要素において、既知となった変位を使用することにより、計算することができる。

今、物体に外力が作用し物体が塑性状態になったとして、その時の弾塑性を求めることを考える。

$$\{d\mathbf{f}\}_m = [\mathbf{K}]_m \{d\boldsymbol{\delta}\}_m \quad (3.1)$$

歪み増分理論により、荷重を増分的に作用させて各増分段階 (Stage) で与えられた解をそれまでの解に加えて所定の外荷重に対する解を求めることになる。

$$\begin{aligned} \{\mathbf{f}\}_i &= \{\mathbf{f}\}_{i-1} + \{d\mathbf{f}\}_i \\ \{\boldsymbol{\delta}\}_i &= \{\boldsymbol{\delta}\}_{i-1} + \{d\boldsymbol{\delta}\}_i \\ \{\boldsymbol{\sigma}\}_i &= \{\boldsymbol{\sigma}\}_{i-1} + \{d\boldsymbol{\sigma}\}_i \\ \{\boldsymbol{\varepsilon}\}_i &= \{\boldsymbol{\varepsilon}\}_{i-1} + \{d\boldsymbol{\varepsilon}\}_i \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 $\mathbf{f}$ は外力、 $\boldsymbol{\delta}$ は節点変位、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみ、 $\mathbf{K}$ は剛性マトリックスを表わしている。また、ここで用いられている構成方程式はフォン・ミゼスの方程式である。本研究では管材料の動的特性のみを考慮する。それにより、解析そのものは準静的解析を使用し、塩化ビニルの動的特性を考慮にいれる。

3.2 材料の動的特性について

高分子材料（塩化ビニル等）の一般的な応力-ひずみ曲線は試験速度によって変化する。試験速度の上昇とともに弾性率、降伏値、引張強度は増大する。伸度は、硬い高分子材料では減少する。応力-ひずみ曲線のカーブは試験速度の上昇によって硬くてもろい型から硬くて粘り強い型へ、そして最後には軟らかくて粘り強い型にまで変わることができる。

さらに、佐藤ら³⁾により圧縮の場合の塩化ビニルの高ひずみ速度における応力と、ひずみとの関係が求められている。それによると、やはり荷重載荷速度の上昇とともに、変形応力が上昇していることが判明した。

また、材料の動的特性で、弾性係数Eも上昇が予想される。図-3.1のグラフの傾きより、ゼロからの接線（初期弾性率）は変化しているが、引

張強度には影響しないと仮定し、ここでは弾性係数Eの試験速度依存特性は考慮に入れなかった。

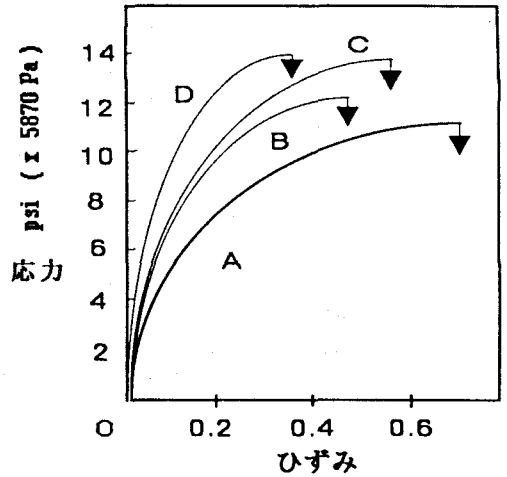


図-3.1 ポリメタクリル酸メチルの試験速度の影響⁴⁾

3.3 塩化ビニル管の構成値と強度の定義について

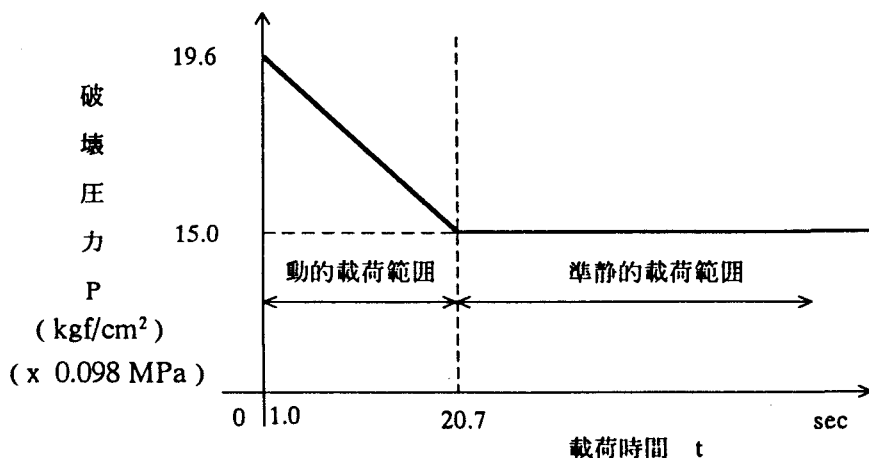
ここで取り扱う塩化ビニル管の構成値は肉厚1.0 mm、管径50.0 mmであり、弾性係数 $3.1 \times 10^4 \text{ kg f/cm}^2$ 、ポアソン比 0.37、せん断弾性係数 $1.17 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度 420 kg f/cm^2 である。また、管の断面は総節点数93、総要素数126に要素分割を行った。実際のパイプは円であるが、今回はすべて半円モデルで解析を行なっている。載荷最大内圧は管内に $15 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ が作用するものとし、載荷内圧を増加させることによって管のみの破壊水圧を解析している。境界条件としては、管を二つに切りその切り口の最上部節点をXY方向に拘束し、その他の切り口節点はX方向変位拘束境界条件としている。

強度計算の基礎となる管材料の引張強度は、主として、一軸応力の引張試験より定められる。これを管に生ずる3方向の応力と直接比較することはできない。ある点での3方向の主応力から合成応力を計算して、初めて一軸応力と同等とすることができる。

管設計の場合、形状エネルギー説、せん断応力説と主応力説の3つがあり、今回はせん断応力説により最大主応力差が一軸応力状態で定められる管材料の引張強度に達すると破壊が生ずると考えた。

表-5.1 各試験速度に対する真の応力の最大値

	真の応力 (kg f/cm^2)	真の ひずみ	クロスヘッド 速度(cm/sec)	引張強度 (仮定)
A	0.843×10^{-3}	0.7	8.3×10^{-4}	420
B	0.879×10^{-3}	0.47	33.3×10^{-4}	437
C	1.010×10^{-3}	0.55	133.3×10^{-4}	504
D	1.010×10^{-3}	0.38	533.3×10^{-4}	504



図一 3.2 準静的および動的载荷範囲

3.4 準静的および動的解析結果との比較検討

準静的応力解析結果と管材料の動的特性を考慮した弾塑性解析結果および佐藤ら²⁾の実験結果を载荷時間により、準静的範囲と動的範囲とに分けて直線近似したものが図一 3.2 である。この図より、準静的範囲は载荷時間 20.7 秒以上となる。载荷時間 20.7 秒以下では载荷時間の減少とともに破壊圧力が急上昇し、その範囲では载荷速度効果が明かとなる動的範囲といえる。

4. 結論

(1) 本研究の結果、水撃圧の载荷時間により、管路への载荷領域を 2 つの範囲に分けることができた。1 つは破壊圧力がほぼ一定となり载荷速度効果の影響がない準静的载荷範囲であり、準静的範囲は载荷時間 20.7 秒以上となり、内圧 15.0 kgf/cm² で応力が管の引張強度に達した。2 つ目は材料の動的特性により破壊圧力が上昇する動的範囲である。

(2) 上水道システムの水撃解析結果と準静的および動的解析結果より、ニードル開度が 20 の場合、载荷時間が 12.7 - 17.1 秒となり管材料の動的的材料特性である载荷試験速度が影響をおよぼす動的载荷範囲に属することが明かとなった。ニードル開度が 15 の場合、载荷時間が 18.9 - 22.0 秒となり、準静的载荷範囲と動的载荷範囲の境界点である载荷時間 20.7 秒の前後となり、境界点付近であることが明かとなった。ニードル開度が 10 で、载荷時間が 約 57 秒とニードル開度が 5 で、载荷時間が 約 140 秒は準静的载荷範囲に属することが明かとなった。

参考文献

- 1) Kono, Y., Sugano, T. and Sugai, Y. : Water hammer suppression methods in water distribution systems in a hilly, Unsteady Flow and Fluid Transients., IAHR, A.A.BALKEMA, pp.53-61, 1992, 10.
- 2) 佐藤清彦、河野幸夫、佐藤裕久：塩化ビニル管の水圧破壊における载荷速度効果の実験的研究、東北学院大学工学部研究報告、1996。投稿中
- 3) 佐藤 裕久、河野 幸夫 他：塩化ビニル管のダイナミックな応力・ひずみ曲線、第 27 回塑性加工春季講演会、1996.5
- 4) 成沢 郁夫：高分子材料強度学、オーム社、1982 年