

水撃管破壊による塩ビ管の動的強度変化について

東北学院大学 学生会員 ○小野 綾香
東北学院大学 正会員 河野 幸夫

1. 水撃圧とは

水の流れでは一般に、水の圧縮性を無視することができる。しかし、管路で高速に流れる水を急激に遮断した場合に水の持っている高い運動エネルギーは水の圧縮と管の弾性変形に費やす仕事へと急変換され圧力が急上昇される。または逆に静止状態の管路内の水が管末端の急な開放によって水が急に流れ出す場合には、水の圧縮と管の弾性変形のエネルギーが瞬間に解放され速度エネルギーに急変換されるため圧力の急降下が生じる。このように水流を急閉鎖または急解放した時に発生する正または負の変化圧力を水撃圧という。また、上記のように水撃圧は水の圧縮性及び管の伸縮を考慮しなければならない。

2. 極座標を用いた薄肉円管の運動方程式の誘導

始めに円管の極座標における運動方程式を誘導するのだが、ここでは一般的な円管内における微小要素について考える。図-1 は円管の微小要素を示したもので、内側より発生する力を応力 σ_r 、円周方向の応力を σ_θ とする。因みにここで管内の膨らみのみを考えているので、肉厚は考慮しないものとする。

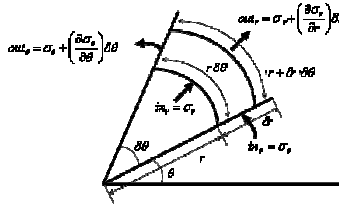


図-1 円管の微小要素

一般的な円管における運動方程式の基本式

$$\rho u = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}$$

ここからは、我々が実際に使用している円管に置き換えて考慮する。

円管における高速拡張理論式

$$2\pi \int_{r_0}^h P r dr = 2\pi r_0 h \int_0^{\epsilon_\theta} \sigma_\theta d\epsilon_\theta + \pi \rho r_0 h v^2$$

内圧の成した仕事を W_e 、塑性変形に費やした仕事を W_p 、運動エネルギーに費やした仕事を W_k とすると、理論式を以下のように表現する事が出来る。

$$W_e = W_p + W_k$$

3. 水撃圧破壊実験目的および方法

3.1 目的

水撃圧が管路にどのような影響を与えるかを考慮するため、上部水槽から下部水槽へと自然流下させ、

管路内に取り付けられた緊急遮断弁を急閉鎖することによって、水撃圧を発生させる。その際に発生した水撃圧によって、管路に接続した塩化ビニル供試体を破壊する。この実験によって得られた実験結果を動的強度変化について検討する。

3.2 実験方法

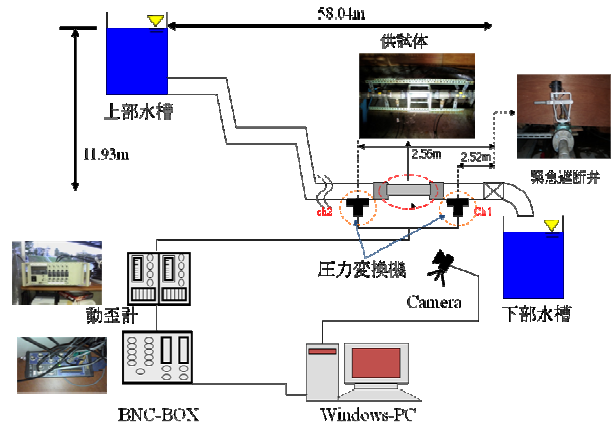


図-2 水撃圧破壊実験装置図

- (1) 塩化ビニル供試体を実験装置に接続し、偏心、引張りなどのほかの作用が働かないように十分に注意してL字フレームを取り付ける。
- (2) 塩化ビニル管の鉄管部分に圧力変換機(CH1,CH2)を取り付ける。
- (3) 遮断弁、手動弁を全開にし、上部水槽から自然流下してくる水を下部水槽へ流出させる。水を流出させる際は、静水圧、流速を正確に測定するために上部水槽をオーバーフローさせておく。
- (4) 遮断弁を閉鎖する。このとき、水撃圧が発生し、供試体は破壊する。

4. 強度を求める式

D: 管の直径 (56mm) E: 管の肉厚(0.4mm)

P: 圧力 (MPa) (実験で得られた数値を用いる)

この両者は同じであるため $2eT=PD$ という式が出来る

$$\begin{aligned} T & (\text{N/mm}^2) \\ 2eT &= PD \\ T &= PD/2e \\ P &= 1.0(\text{MPa}) \\ T &= (1.0\text{MPa} \times 56\text{mm}) / (2 \times 0.4) \\ &= 70(\text{N/mm}^2) \end{aligned}$$

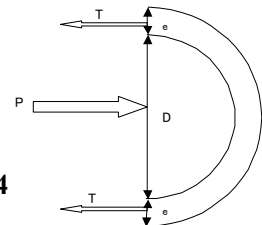


図-3 塩化ビニル供試体の断面図

5. 実験結果

5.1 破壊時(V=1.5m/s)の水撃波形図

流速 1.5(m/s)では、最大圧力 1.147(MPa)、強度 80.32(N/mm²)、破壊時圧力 0.986(MPa)、載荷時間 0.02(s)となった。

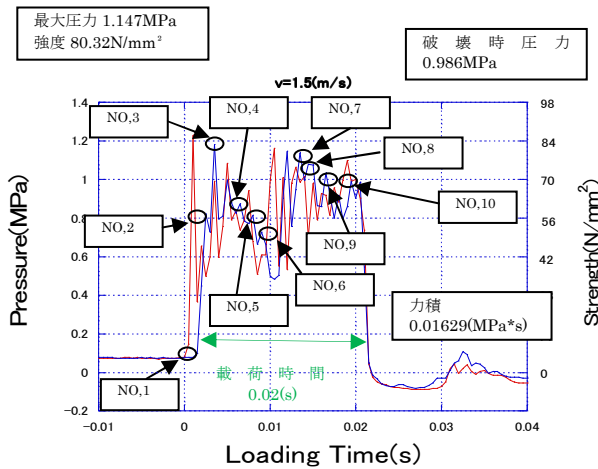


図-4 破壊時(V=1.5m/s)の水撃波形図
力積は次のように求められる。
圧力×Δt=長方形に近似した面積
これらは一点ずつの値なので、全て足したものが力積となる。今回は 0.0163(MPa*s)となった。

全実験データの力積を求め載荷時間との関係を次に示す。バラつきがなく、0 に収束していることがグラフから読み取れる。

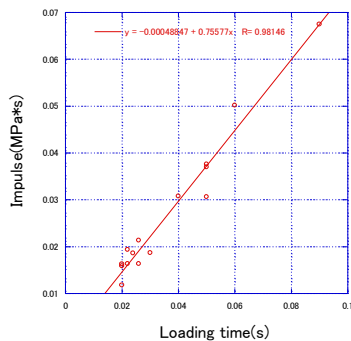


図-5 載荷時間と力積の関係

破壊の瞬間の画像を次に示す。
左が破壊から 0.003 秒前の写真、右が破壊の瞬間の写真となる。

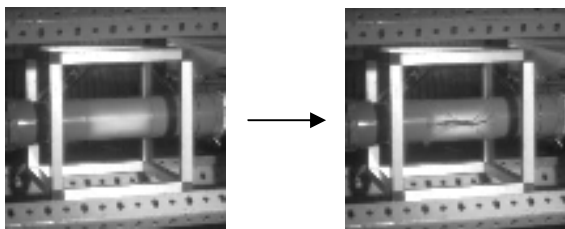


図-6 高速度カメラによる破壊の瞬間の画像

図-4 のグラフと図-6 の写真より応力とひずみを求める。以下にその方法を示す。

ひずみ 応力(N/mm²)

0.0000	0.0000
0.0074100	5.4687
0.0074100	31.445
0.022200	46.484
0.022200	50.928
0.037000	63.232
0.044400	66.309
0.051900	75.537
0.059300	64.941
0.066700	60.156

ひずみの求め方

Δr (膨らみ)/ r (28mm) = ϵ (ひずみ)
ここでの膨らみは写真より
ノギスで計測した値を用いる。

応力の求め方

圧力(Excel データより)×70(N/mm²)

5.2 応力・ひずみ曲線

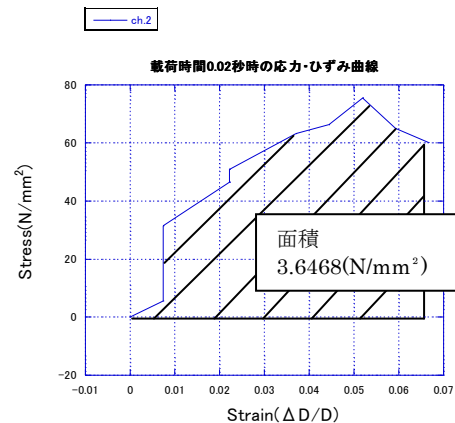


図-7 載荷時間 0.02 秒時の応力・ひずみ曲線
平均ひずみ速度

$$\epsilon / t = 0.0667 / 0.02 = 3.335(1/s)$$

求めた面積、3D 解析で算出した最大膨らみ速度を運動方程式に代入し W_p 、 W_k を求める。

$$\begin{aligned} W_p &= 2\pi r_0 h \int_0^{\epsilon_\theta} \sigma_\theta d\epsilon_\theta \\ &= 2 * \pi * 28(mm) * 0.4(mm) * 3.6468(N/mm^2) \\ &= 256.63(N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_k &= \pi \rho r_0 h_0 v^2 \\ &= \pi * 102(kgf \cdot s^2 / m^4) * 0.028(m) * 0.0004(m) * 34^2(1/s) \\ &= 40.66(N) \end{aligned}$$

$$W_e = W_p + W_k = 212.065 + 1.507 = 297.29(N)$$

6. 結論

(1) 塩化ビニル供試体は、最大圧力 1.006MPa (70.41N/mm²) までの水撃圧には耐えられたが、最大圧力 1.056MPa(73.83N/mm²)の水撃圧には耐えられなかった。このことから、塩化ビニル供試体の強度は 70.41N/mm² 以上であることがわかった。

(2) 流速 1.5(m/s)では、載荷時間 0.02(s)、力積 0.0163(m・s)となった。

(3) 応力・ひずみ曲線の面積は 3.6468(N/mm²)、平均ひずみ速度 3.335(1/s)となり運動方程式 W_p は 256.63(N)、 W_k は 40.66(N)となった。