

水圧による塩化ビニル管の準静的破壊による強度変化と力積について

東北学院大学工学部 学生会員 ○成田 佳朗
東北学院大学工学部 正会員 河野 幸夫

1. 目的

本研究では、塩化ビニル管の供試体に電動ポンプによる水圧载荷を行い、実際に破壊し以下の項目を明らかにすることを研究目的とする。

- (1) 塩化ビニル供試体の強度を求める。
- (2) 最大圧力及び強度と、水圧载荷時間、さらに塩化ビニル供試体の破壊領域がどのような関係になっているかをグラフに表し、力積を求める。
- (3) 応力ひずみ曲線から、ひずみ速度と内圧の成した仕事を求める。

2. 円柱座標系における半径方向の運動方程式

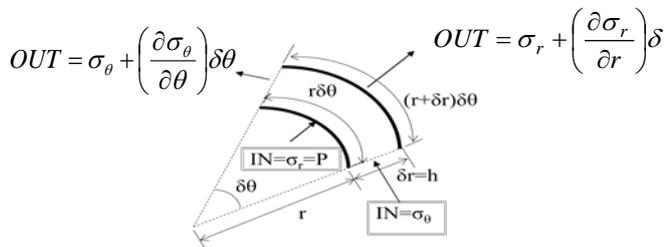


図-1 円管の断面図

円柱座標系における運動方程式は以下の式によって与えられる。

$$\rho u = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \dots (1)$$

半径方向の肉厚における応力 σ_r は肉厚が非常に薄いため 0 と考える。そして内圧 σ_r は P と置きかえる。その結果、方程式(1)は方程式(2)となる。

$$\rho u h = P - \frac{\sigma_\theta}{r} \dots (2)$$

方程式(2)を r_0 から r まで積分すると方程式(3)が得られる。ここで $\epsilon_\theta = dr/r$ となる。

$$2\pi \int_{r_0}^r pr dr = 2\pi r_0 h_0 \int_0^{\epsilon_\theta} \sigma_\theta d\epsilon_\theta + \pi pr_0 h_0 \cdot v^2 \dots (3)$$

内圧が成した仕事を We 、塑性変形に費やした仕事を Wp 、運動エネルギーに費やした仕事を Wk とすると、方程式(3)を方程式(4)と表すことができる。

$$We = Wp + Wk \dots (4)$$

3. 強度を求める式

塩化ビニル供試体に作用する力は図-2のようになる。Tは強度(N/mm²)、Pは圧力(MPa)、eは管の肉厚0.4(mm)、Dは内径56(mm)を示しており、右の式で塩化ビニル供試体の強度を求めることができる。

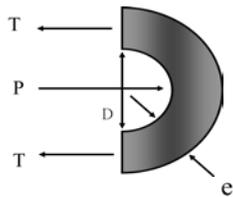


図-2 塩化ビニル供試体断面図

$$2eT = PD$$

$$T = \frac{PD}{2e} (N/mm^2)$$

4. 実験方法

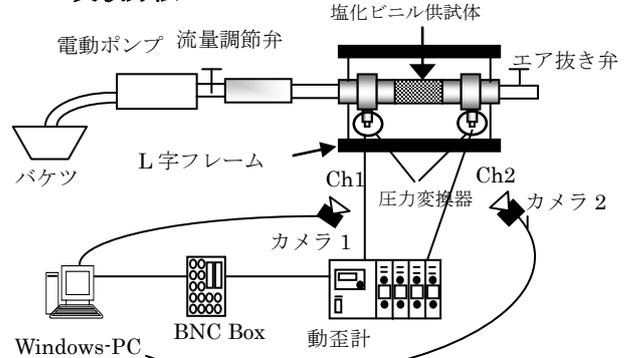


図-3 水圧破壊実験装置図

- (1) 塩化ビニル供試体を実験装置に接続し、偏心、引張りなどの作用力が働かないように注意して、管路軸方向の伸びが発生しないように4本のL字フレームによりしっかりと固定する。
- (2) 塩化ビニル供試体を接続している鉄管の両端部分に、圧力変換器 Ch1 と Ch2 を取り付け、動歪計、BNCBOX を経由して Windows-PC に接続する。また、画像も同時に撮影するため、2台の高速度カメラも設置する。
- (3) 電動ポンプを使用して水圧载荷を開始する。载荷開始から塩化ビニル供試体破壊までの時間は0秒から500秒程度で行う。水圧载荷中に水漏れがないかをよく確認する。

5. 実験結果

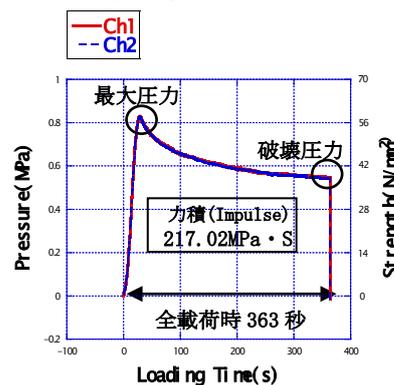


図-4 準静的破壊



図-5 破壊 0.02 秒前

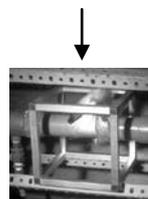


図-6 破壊の瞬間

図-4は水圧载荷開始から破壊までを示した準静的破壊のグラフであり、縦軸に圧力(MPa)及び強度(N/mm²)、横軸に時間(s)をとっている。载荷開始から最大圧力0.830MPaまで27秒かかり、336秒間の塑性状態を経て、破壊圧力0.547MPaで急速に破断した。強度は、強度を求める式を用いて計算した結果、以下ようになった。

$$T = \frac{0.830 \times 56}{2 \times 0.4} (N/mm^2) = 58.1 (N/mm^2)$$

力積は次のようにして求めた。

$$(1) \square\square (MPa) \times \Delta t(s) = P \cdot \Delta t(MPa \cdot s)$$

$$(2) \sum P \cdot \Delta t(MPa \cdot s)$$

今回圧力は0.02秒ごとに記録したので、 Δt を0.02とおいた。(1)の式を用いて载荷開始から破断まで0.02秒ごとに圧力をかけ、最後に(2)の式を用いて、力積を求めた。その結果、力積は Impulse=217.02 (MPa・s) となった。

6. 力積

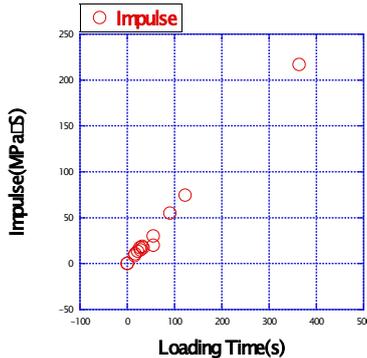


図-7 実験データ力積

図-7はいくつかの実験データの力積のグラフである。縦軸に力積(MPa・s)、横軸に時間(s)をとったグラフである。

载荷時間が短いと力積は非常に小さく、载荷時間が長いほど力積は非常に大きくなった。

7. 応力ひずみ曲線

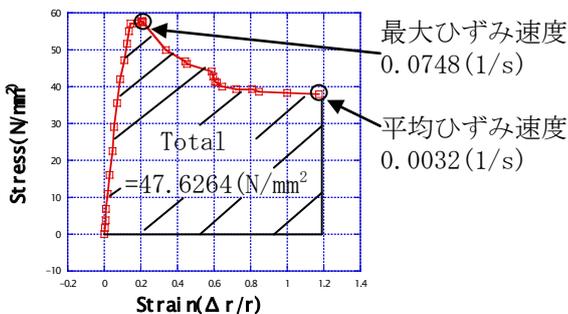


図-8 応力ひずみ曲線

図-8は5の実験結果から得られた応力ひずみ曲線のグラフである。ひずみは高速度カメラで撮影した画像から、供試体が膨らむ様子をパソコンの画面上でノギスを使用して測定し、以下の式を用いて求めた。

直径D(56mm):画面上直径=膨らみ Δr (mm):{画面上膨らみ-画面上直径}、 $\epsilon = \Delta r$ (mm)/r(28mm)
また、応力は強度を求める式から求めた。

ひずみ速度は $\frac{\Delta \epsilon}{\Delta t(s)}$ で求めることができ、最大ひずみ速度は、 $0.2019/27(s)=0.0748(1/s)$ となり、平均ひずみ速度は、 $1.1731/363(s)=0.0032(1/s)$ となった。

応力ひずみ曲線の面積は、47.6264(N/mm²)となった。面積の求め方はグラフ用紙に図-8と同じ図を描き、近似線を引き、三角形と長方形に分けて面積を求め、それらを全てたして求めた。

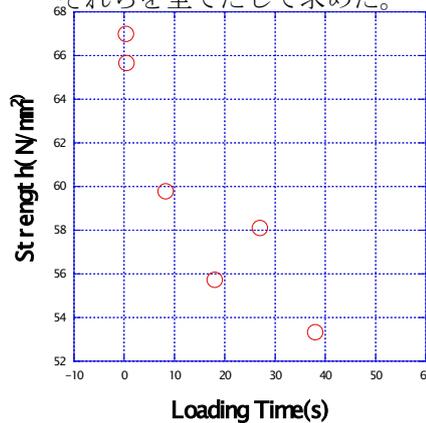


図-9はいくつかのデータの強度のグラフである。縦軸に強度(N/mm²)、横軸に時間(s)をとったグラフである。载荷時間が非常に短い破壊は強度が高くなっているが、载荷時間が長くなるほど強度は低くなった。

図-9 実験データ強度

7.1 塑性変形に費やした仕事Wpを求める。

$$Wp = 2\pi r_0 h_0 \int_0^{\epsilon_\theta} \sigma_\theta d\epsilon_\theta = 2\pi r_0 h_0 \cdot 47.6264(N/mm^2)$$

応力ひずみ曲線から求めた面積を代入する。

$$= 2 \times \pi \times 28(mm) \times 0.4(mm) \times 47.6264(N/mm^2) = 3351.550(N)$$

7.2 運動エネルギーに費やした仕事Wkを求める。

$$Wk = \pi r_0 h_0 \cdot v^2$$

実験データから求めた膨らみ速度をvに代入する。

$$Wk = \pi \times 102(kgf \cdot s^2/m^4) \times 0.028(m) \times 0.0004(m)$$

$$Wk = \pi r_0 h_0 \cdot 0.000090306^2(m/s)^2 \times 0.000090306^2(m/s^2) = 2.927 \times 10^{-11}(N)$$

静的な破壊では、運動エネルギーに費やした仕事は、限りなく0に近い値になるので、Wkは0として考える。

7.3 内圧が成した仕事Weを求める。

$$We = Wp + Wk = 3351.550(N) + 0(N) = 3351.550(N)$$

8. 結論

(1)塩化ビニル供試体の強度は、図-9から载荷時間が非常に短い動的な破壊では強度が高くなり、载荷時間が長くなるほど、強度は低くなるということがわかった。

(2)力積は载荷時間が短いときは非常に小さく、载荷時間が長くなると力積は非常に大きくなった。载荷時間が短いと圧力は大きくなるが、破壊に必要なエネルギーは小さいということがわかった。

(3)载荷時間363秒のときに塑性変形に費やした仕事Wpは3351.550(N)となり、運動エネルギーに費やした仕事Wkは $2.927 \times 10^{-11}(N)$ となり、限りなく0に近い値となった。

内圧が成した仕事Weは3351.550(N)となった。