

へこみ損傷をもつ既設パイプラインの疲労寿命推定

武蔵工業大学 学生会員 久保田 健悟 正会員 小池 武

1 はじめに

へこみ損傷をもつパイプラインの疲労寿命は、損傷のない場合に比較して、初期亀裂や初期へこみがどの程度疲労寿命に影響を及ぼすのか、また一定振幅荷重と自動車荷重や内圧変動といった変動荷重の違いによる作用応力の違いが疲労寿命に及ぼす影響について検討する。

2 損傷パイプラインのモデル化

使用するモデルは高圧ガス導管で劣化のモデルをへこみ損傷モデルとする。また荷重のモデルとして一定振幅荷重、変動荷重、間欠波荷重の3種類を考える。

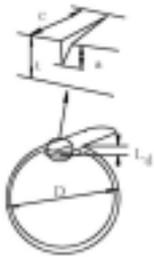


図1 へこみ損傷モデル

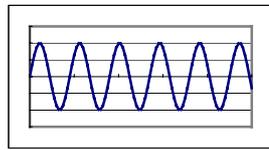


図2 一定振幅荷重

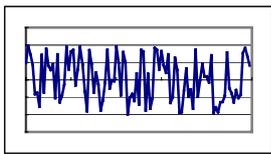


図3 変動荷重
(自動車荷重)

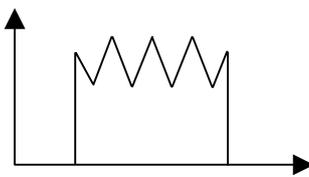


図4 変動荷重
(内圧変動)

3 損傷パイプラインの疲労寿命推定

3.1 破壊モードと破壊基準

へこみ部分の先端に深さ a の亀裂が存在する場合を考える。荷重が繰り返し作用してこの亀裂が進展すると、へこみ損傷パイプの強度は非損傷時の強度より劣化する。その大きさは次式で与えられる。

キーワード：パイプライン、疲労寿命、へこみ損傷
レインフロー

$$\sigma_{cr} = \sigma_{flow} \cdot f(a) \quad (1)$$

ここで、

σ_{cr} : 亀裂損傷したパイプの強度

σ_{flow} : 正常なパイプの強度 (flow stress)

$f(a)$: 亀裂によって強度劣化を評価する実験式

$$f(a) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(s) \quad (2)$$

$$s = \exp \left[-\frac{1.5\pi E}{\sigma_{flow}^2 A a} \cdot \frac{\exp \left\{ \frac{\ln(Cv) - K_1}{K_2} \right\}}{\left\{ Y_1 \left(1 - \frac{1.8Ld}{2R} \right) + Y_2 \left(10.2 \frac{Ld}{2t} \right) \right\}^2} \right] \quad (3)$$

$$Y_1 = 1.12 - 0.23 \left(\frac{a}{t} \right) + 10.6 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 21.7 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + 30.4 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \quad (4)$$

$$Y_2 = 1.12 - 1.39 \left(\frac{a}{t} \right) + 7.32 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 13.1 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + 14.0 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \quad (5)$$

ただし、 σ_{flow} : 管材の強度 (lbf/in²)

E : ヤング係数 (30,000,000 lbf/in²)

A : 2/3 Charpy 試験片の破損部面積 (=0.083 in²)

d : 破損部深さ (in), Ld : ゼロ圧力で測ったへこみ部の深さ (in), R : 管の半径 (in)

C_v : 靱性値 (2/3 シャルピー靱性値 (ftlbf))

K_1, K_2 : 非線形パラメータで $K_1=1.9, K_2=0.57$

そして、パイプの破壊は作用応力 $\Delta\sigma$ が式(1)の強度 σ_{cr} を超過した時に発生する。

亀裂の進展は Paris 則を用いて次式で推定できる。

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (6)$$

ここで K は応力拡大係数であり、作用応力に対応する応力拡大係数は次式で与えられる。

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} F \left(\frac{a}{W} \right) \quad (7)$$

ここで、関数 F はへこみ亀裂モデルに対応する形状係数である。

東京都世田谷区玉堤 1 丁目 28 番 1 号

TEL : 03-3703-3111

3.2 疲労寿命推定

3.2.1 一定振幅する荷重が作用する場合

一定振幅荷重の場合には、式(4)の一般解は次式で求められる。

$$a(t) = \begin{cases} a_0 \exp \left[C \left(F \left(\frac{a}{W} \right) \sqrt{\pi} \right)^2 \sum_{i=1}^{N(t)} \Delta \sigma_i^m \right] & m=2 \\ \left\{ a_0^{\frac{2-m}{2}} + \frac{2-m}{2} C \left(F \left(\frac{a}{W} \right) \sqrt{\pi} \right)^m \sum_{i=1}^{N(t)} \Delta \sigma_i^m \right\}^{\frac{2}{2-m}} & m \neq 2 \end{cases} \quad (8)$$

また一定振幅荷重においては、式(6)の $\sum_{i=1}^N \Delta \sigma_i^m$ を

単純に $\Delta \sigma_i^m \cdot N$ として計算する。

3.2.2 変動荷重が作用する場合

自動車荷重については、(6)式の $\sum_{i=1}^N \Delta \sigma_i^m$ を

$$E \left[\Delta \sigma_i^m \right] \cdot N \text{ とし、応力頻度をレインフロー法を用いて計数した後、ヒストグラムを用いて応力の期待値を算出する。}$$

内圧変動については、一次波である平均応力を修正 Goodman の式を使用して評価し、二次波は 3.2.1 の一定振幅する荷重が作用する場合を用いる。

4 計算結果

4.1 一定振幅荷重

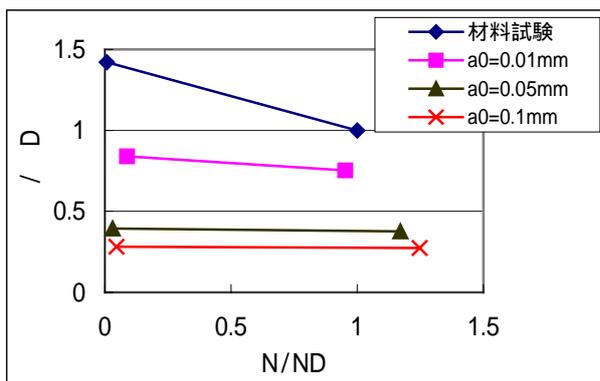


図5 初期亀裂を変化させた時の強度

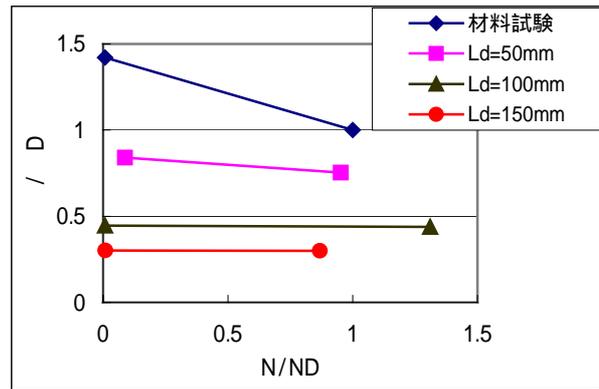


図6 初期へこみを変化させた時の強度

4.1 変動荷重

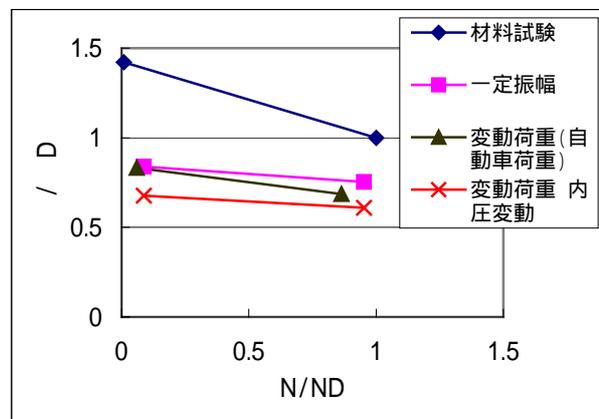


図7 変動荷重時の強度

4 結論

初期亀裂、初期へこみのグラフから亀裂による強度の低下が大きいことがわかった。しかし、実際は亀裂のみが発生することは稀であり、ほとんどの場合へこみと亀裂は同時に発生するものである。したがってこの二つのパラメータの相乗効果によってパイプの強度は著しく低下するものと考えられる。また変動荷重は、一定振幅荷重よりも少なからず強度の低下があることがわかった。よってパイプの疲労寿命を推定するにはこのことを考慮に入れる必要があると考える。

5 参考文献

疲労設計便覧、日本材料学会編、養賢堂、P208、209、219、220 等