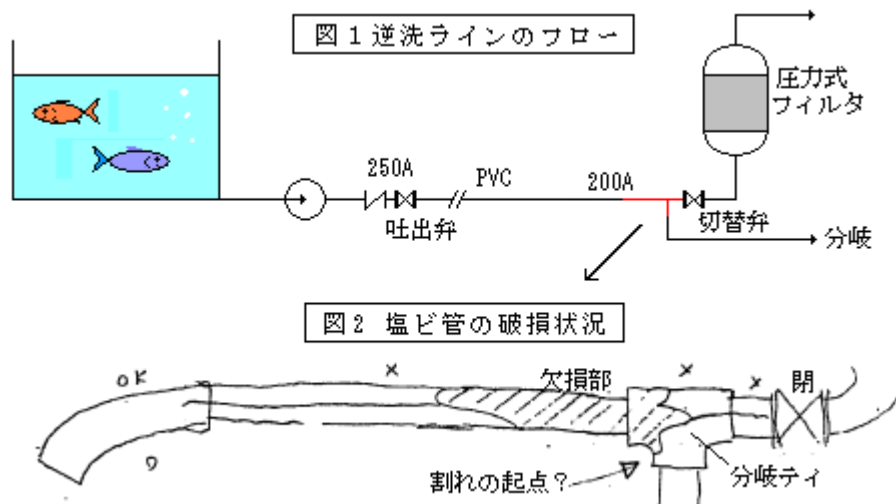


【整番】 FE-06-TC-005	【標題】 水撃による逆洗ラインの塩ビ管の破損
分類：流れ(非定常流れ)／種別：トラブル事例	作成年月：H19.7／改訂：Ver0.0 (H19.8)
	作成者：N.Miyamoto

全4枚

1. あらまし

水族館の水槽から引いた逆洗ポンプが起動したとき、吐出ライン(逆洗ラインと呼称)の分岐切替弁の手前の分岐管および直管部分で破裂が起きた。運転の状況また破損の状況からみて異常な水撃圧が発生した気配があり、種々検討した結果、ラインに存在する空気溜まりが原因になっていることがわかった。以下その概要を記す。



2. 状況

逆洗ラインのフローを図1に示す。この逆洗ラインは、正規の水槽循環系がストップした後で逆洗ポンプを起動してフィルタユニットに水槽の汚れた水を送るラインで、バッチ運転になっている。逆洗ポンプはかなり離れた位置にある切替弁を閉じた状態で起動される。ポンプ吐き出し弁は常に全開。

破裂は切替弁の手前で起きた。その状況を図2に示す。塩ビ管メーカーの見解は、

“ティのクロッチ(交叉)部で割れが起こり直管部に伝播したようだ。クラックの拡がりや破面の様子はティ管の内圧破壊テスト結果によく似ている“

とのことであった。

3. 原因とメカニズム

(1) 破断状況からみて、逆洗ポンプ起動時、過剰な圧力上昇が加わって円周(フープ)方向に高い応力がでて破断したと思われる。この場合、パイプ/分岐ティのフープ応力 σ_h を見積もってみると、

$$\text{パイプ： } \sigma_h = Ck_d P_s D / (2t) = 1.0 \times 1.0 \times 4.6 \times 21.6 / (2 \times 1.1) = 45 \text{ kg f/cm}^2$$

$$\text{分岐ティ： } \sigma_h = Ck_d P_s D / (2t) = 1.5 \times 1.0 \times 4.6 \times 24 / (2 \times 1.5) = 55 \text{ kg f/cm}^2$$

ここで C =応力係数、 k_d =動荷重係数、 P_s =始動時の瞬間圧力(kg/cm²)、 D =管径(cm)、 t =肉厚(cm)

[C 、 k_d については後述する。]

始動時の $P_s = 4.6 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ は、 $P_s = 2 \times$ 締切圧(2.2 kg/cm²) + 吸込圧力 0.2 kg/cm² G = 4.6 kg/cm² による。ポンプの締切圧の2倍としたのは、起動状態の逆洗ラインが下図のような締切始動モードになっているからである。このモードではポンプから伝播した圧力波は閉鎖端で同位相に反射されて2倍の大きさになる。この場合、サージ圧は閉鎖端で最大になりポンプに戻るにつれて減少する。

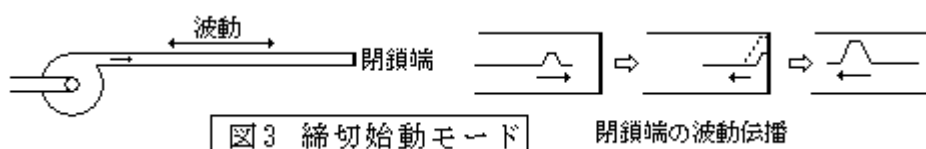


図3 締切始動モード

破損が閉鎖端にある分岐とこれに繋がるパイプ/エルボで起きていることは、このサージ圧の傾向と合致している。然るに予想されるフープ応力 45、55 kg f/cm²は、材料の最小引張強さ 480kgf/cm²に比べはるかに小さい?! ティを破断させるに必要な瞬間圧力(破壊圧)は $(480/55) \times 4.6 = 40$ kg/cm²にもなる。メーカーの保証値もこの辺りである。

- (2) 現場からの報告では、ラインの停止中に切替弁手前に空気溜まりができていたという。これはもともと水槽廻りの配管には混入空気が多い上に、切替弁手前の分岐ラインのレベルが低く形状的に空気が分岐点トップに集まり易いからである。

文献(1)に、末端に空気溜まりのできた両端閉鎖管路の一端を急開し圧力源に繋ぐと、始端圧力上昇の4倍弱の圧力上昇が末端に発生することが報告されている。このモードは締切始動モードに酷似している。この結果を使えば、始動時の瞬間圧力は $P_s = 4 \times 2.2 + 0.2 = 9$ kg/cm²G になる。

確認のため、文献(3)の解法を準用して、本ケースの末端圧力上昇を計算すると、始端圧力上昇の約 3.7 倍の末端圧力上昇がおき $P_s = 3.7 \times 2.2 + 0.2 = 8.1$ kg/cm²G となる。いずれにしても、破壊圧 40 kg/cm²G にはまだまだ遠い。

- (3) 締切始動時に大きな圧力上昇が発生することはよく知られており、実験/解析がいくつか報告されている（[FE-06-TM-012 空気溜まりのある管の圧力上昇に関する情報]を参照されたし）。文献(2)では、締切始動の場合に締め切り圧の 8.7 倍の異常な圧力上昇が発生することを報告している。ただ、これは先止まり管路がポンプ始動前に負圧(-8mAq)になっている場合で、当該ケースが正圧(0.2 kg/cm²G)であることとは合わない。しかし、この文献でも議論されるようにこの現象を振動現象ととらえれば、8.7 倍の異常圧力上昇の原因のひとつに共鳴/共振が存在しているのかもしれない。そして本ケースでも締切圧の 4 倍を優に越えるような共鳴現象が起きたのかも知れない。

しかし締切圧 20 倍はとても想像できない。おそらく延性破損とその伝播はほぼ否定できるだろう。そこで、可能性のある別の仮説、

“応力集中のある分岐ティ部分に疲労によって微小クラックが発生し、そのクラックがある程度進行した後、肉厚不足になり一気に延性破断して周辺に亀裂が伝播がした “

について考えてみる。

- (4) 分岐ティの内圧によるピーク応力は次式で与えられる。

$$S_p = CK k_d P_s D / (2t)$$

ここで、C=応力係数、K=構造不連続による応力係数、k_d=動荷重係数、

P_s=始動時の瞬間圧力 (kg/cm²)、D=管径(cm)、t=肉厚(cm)

Cは断面平均の応力集中係数で、ティであれば 1.5 程度。Kはティ形状による応力集中係数で 3~4。ここでは CK=5 とする。

動荷重係数 k_d は、負荷が急激に加わることを考慮したもの。ポンプ始動時間 t_F は本ケース、直入れ起動のために 1sec.程度。一方、管の固有周期 T_n は約 0.0005sec.、故に $2t_F/T_n=2/0.0005=4000$ となる。 $[2t_F/T_n]$ がこんなに高いと、殆ど動荷重係数は 1.0 に収まる(これは文献(2)の計測結果でも然り)。

ここで、締め切り圧の 4 倍をとって $P_s=9 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とすれば、発生するピーク応力は、

$$S_p = CK k_d P_s D / (2t) = 5 \times 1 \times 9 \times 24 / (2 \times 1.5) = 360 \text{ kg f/cm}^2$$

さて、硬質塩ビ管の疲労曲線は下図のようである(4)。

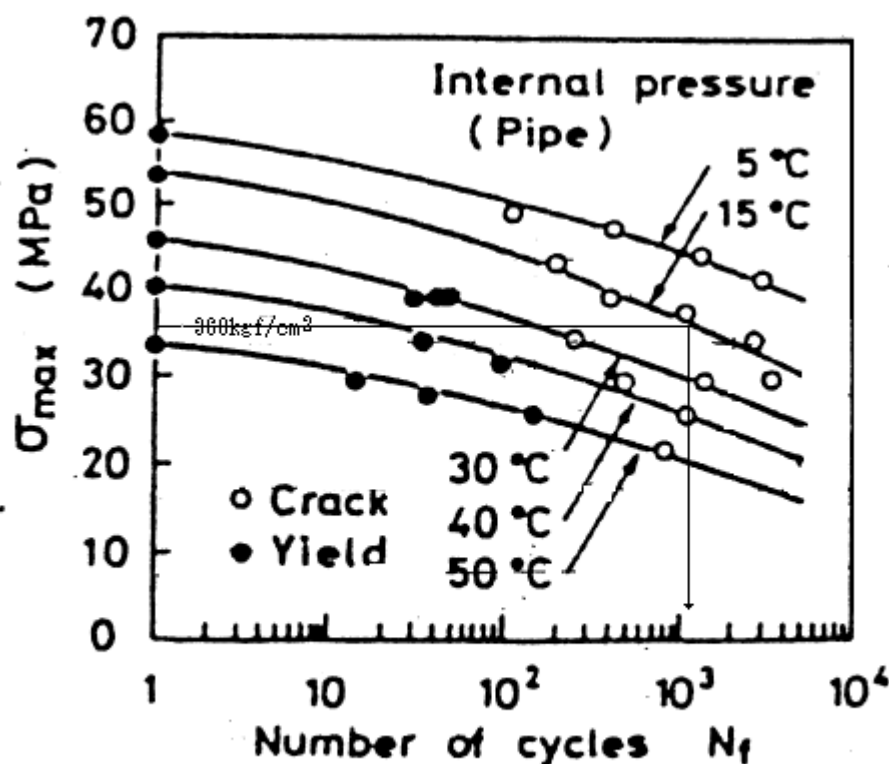


図4 硬質塩ビ管の疲労曲線(文献(4)より引用)

これによれば $\sigma_{max.} = S_p = 360 \text{ kg f/cm}^2$ に対し、疲労サイクル N_f は 1000 回である。逆洗ラインは 3 年弱使用されており運転が 1 日 1 回なので、通算水撃回数は 800 回程度になる。そしてこの水撃では減衰形の振動を起こすが、2 回以降の圧力上昇は半減するので殆ど 1 回目の圧力上昇のみが有意であり、応力サイクルは累積 800 回と考えられる。従って、寿命には多少不足していることになる。しかし、前述の仮説のように、この種の破損はある程度クラックが進んだ時点で一気に延性破断したとみるのが実際的であるから、応力サイクル 800 回付近で破壊に至ったと結論づけられる。

なお本ケースでは著しい亀裂の伝播に特徴がある。これは硬質塩ビの材料特性にもよると思われるがもうひとつには、管路末端にかなりの空気溜まりができていたためではないか？ 空気溜まりはポンプ始動の瞬間、水柱に押し込まれて圧縮され、高い PV 値域が末端の分岐ティ付近に形成される。それと同時にティが破損し PV エネルギーが開放される過程で、かなり深く亀裂が伝播したと考えられる。

- (5) 以上のように疲労先導形の延性破損の蓋然性は高い。破損観察したメーカーの見解は、単純な内圧に延性破断であり疲労の痕跡(シェルビーチ)は報告されていない。しかしプラスチック材に、金属材と同じように特徴的なシェルビーチが現れるかは疑問である。多分に見落としの可能性も否めない。

3. 是正措置など

この場合、トラブル防止策として次のようなものが挙げられる。

- (1) ポンプの始動時間を長くする。2次抵抗始動など緩和駆動方式の採用。
- (2) 末端分岐ティ近傍に空気抜きを設ける。
- (3) ポンプに始動に際して末端の切替弁のバイパスの弁を開ける(バイパス弁はあるが…)。
- (4) 材質を鋼管に替える。

結局、(1)+(2)が採用されたようだ。その後のトラブルの再発は聞いていない。

引用文献：

- (1) 北川ほか「管内の残留空気が過渡現象に及ぼす影響」油圧と空気圧 S 50.3
- (2) 富田,中村「ポンプ締切始動時の空気溜まりによる水撃現象」エハラ時報 No.127(1984-1)
- (3) 鷲尾「管内流体の過渡波動現象解析」機械学会講演会ドラフト
- (4) 「硬質塩化ビニール管の疲労強度」材料 Vol.37 # 439