

| | | |
|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 【整番】 FE-15-TM-001 | 弁のキャビテーションデータとその応用 (Tullis) | |
| 分類: 流れ(キャビテーション)/種別: 技術メモ | 作成年月: H19.8/改訂: Ver0.0 (H19.8) | 作成者: N.Miyamoto |

全 13 枚

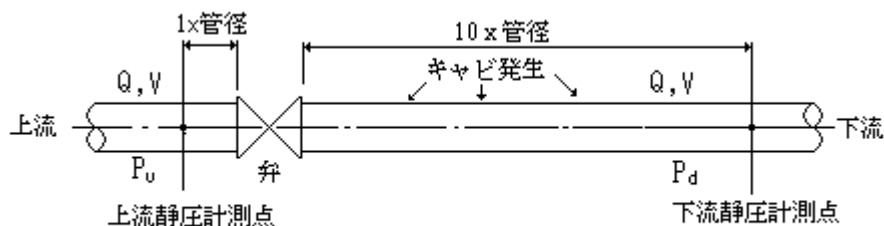
近年の CFD の進歩によって近年は CFD の進歩で解析的なアプローチも可能になってきた。しかし通常のキャビ評価は、実験データに根拠を置くことが多い。この場合、既知の実験データを如何に運用するか? この問題に対して、下記の文献、

「Cavitation Data for Valves and its Application」 by J.P.Tullis & J.W.Ball

(Proceedings of Conference on Cavitation, Edinburgh, U.K Sep.1974)

は、かなり端的な回答即ちシンプルな圧力/スケール調整式を提案している。この文献は南カルフォルニアメトロポリタン水区(MDW)とコロラド州立大(CSU)の共同プロジェクトの成果を総括したもので、キャビテーション分野ではよく知られている。本 TS は、この Tullis らの提案の内容を紹介するものである。

基本的には要訳の形をとっているが、部分的にはかなりアレンジしているので了解願いたい。



Tullis文献の弁設備イメージ

【 Tullis 文献の内容 】

以下本 TS で用いた Tullis 文献の内容を要約して紹介する。この文献の主要な論点は以下の通り。

- ・各キャビテーション状態(レベル)におけるデータとその運用
- ・各キャビテーションレベル(初生/限界/初生損傷/チョーキング)の特性
- ・圧力及び寸法に関するスケール効果の調整方法の提案

文献で使用される記号の定義は次の通り。

C =(3)式の定数、 C_d =排出係数[(1)式]、CSU=コロラド州立大学、 D =大管径、 d =小管径、 M =圧力寸法効果式[(5)式]の乗数、MWD=南カルフォルニアのメトロポリタン水区
 N =圧力寸法効果式[(4)&(8)式]の乗数、 P_d =下流圧力、 P_u =上流圧力、 P_v =蒸気圧、 V =平均管内流速、 V_o = 弁開度 (deg. or %)、 $\Delta P = P_u - P_d$ 、 ρ = 質量密度、 σ = キャビテーション係数[(2)式]

サフィックス c →限界キャビテーション、 ch →チョーキングキャビテーション

I →初生キャビテーション、 id →初生損傷、 o →実験データ

<イントロダクション>

弁及び弁を含む設備の設計/運転維持上、[弁のキャビテーションの可否、その強さおよび環境への影響]に関する評価は特に重要である。この場合

- ・ 実験データへの依存度が強いので、使用するデータが対象弁に対し適正であるか?
- ・ 対象弁のキャビテーションの許容レベル(キャビ限界)をどこに設定するか?

が課題になる。前者については、当該の弁タイプ/運転圧力/構造詳細をよく把握する必要がある。実験データの適用を誤るとかなり深刻な結果を招く。後者についてはキャビの影響(振動/騒音/エロージョン/弁容量の低下)を把握して

【設備の運転方法】、【弁の設置場所】、【キャビ弁の寿命】、【設計詳細及び経済性】

などを考慮する。例えば、

当該弁がラインへの1時的なチャージや圧力レリーフに使われるのであれば、きついレベルでも許容できるし、連続して使用されるならもっと軽度なレベルでも許容できない。また、

弁の設置場所にしろ居住域にあるものは軽度なレベルでも制約を受けるが、住宅地にないものはもっときついレベルでも可となる(特に水道設備)。更に、

弁やその配管の設計詳細も許容レベルに関係する。例えば拡大部分を後流にもつニードル弁の場合、キャビによって拡大部分の壁にエロージョンが進んで損傷する。しかし、拡大比が大きくなると損傷の確率は少なくなり、むしろ騒音/振動/弁効率の低下が重要になる。

[この項かなりアレンジして記述]

<キャビテーションのレベル>

初生/限界/初生損傷/チョーキングの4つのレベル(限界)がある⁽⁵⁾。これらのあらまきは以下の通り。

まず**初生キャビテーション(Incipient cavitation)**について。キャビテーションの初期段階を云うが定義が難しい。通常、加速度計でキャビ強度を計測し、加速度計出力 vs キャビテーション指数のプロット図からキャビ限界を評価する。キャビがでると曲線にシャープなブレイクがでる^(☆1)。

初生キャビテーションの強さは軽微で、間欠的なポップ音の形をとる。その音は流れの音に混じっており余程注意深く聞かないと判らない。この初生キャビを許容限界にするのは余りに保守的であって、そんな事例はほんの数例しかないだろう。

次に**限界キャビテーション(Critical cavitation)**について。これは初生キャビテーションのすぐ上位にくる。このリミットも加速度計で計測される。騒音は絶え間ないが軽い。それはホットグリルでいためられているベーコンのような感じがある。通常の会話に支障はない。騒音は許容されても、うるさい騒音、エロージョンあるいは振動は回避すべきである。例えば、**連続使用の市水調整弁**ではこれをリミットにしている。限界キャビテーションは嫌悪されるようなものではなく、また弁の寿命を縮めるようなものでもない(が、それを越えると問題がでる)。それ故”**Cavitation free operation**”の**上限の指標として推奨されている**。最もデータが多い。

次に**初生損傷(Incipient damage)**について。エロージョンが起きる流れ状態を識別するのに有効な情報は殆ど見当たらない。実験が難しいからである。(Tullis は)初生損傷の評価方法を提案し結果を報告している⁽²⁾が、有効性が限られているためか反応は少ない。また初生損傷の場合は、試験装置によって騒音/振動にバラツキがある。例えば開口比が小さいオリフィスの場合は壁面にピッチングを起こすには重いキャビが必要であるが、開口比が大きくなるともっと低いキャビレベルでもピッチングがおきるようになる。そして一端ピッチングが起きると、装置の流速がわずかに増しても、また圧力がわずかに下がっても、損傷が急激に加速される。

実験に拠れば重量の減少率は流速のベキ乗に比例しベキ指数は7程度になる。故に**初生損傷レベルを越えて運転される弁は急激にエロージョンを受ける恐れがある**。

次に**チョーキングキャビテーション(Choking cavitation)**について。弁の通過流量が増すにつれて弁直後の圧力は蒸気圧以下になり弁はチョークを起こす。チョークは弁の最大吐出状態を意味する。チョーキング近くで弁のキャビテーション強さは最大に達し流れは不安定になる。下流側圧力がわずかに変化することでスーパーキャビテーションが起き蒸気圧が断面一杯に広がって弁から離れた位置で崩壊する。この状態では弁の損傷は起きない。逆にこの大規模なキャビテーションは、下流側圧力の僅かな変化によっても消滅し気泡崩壊は弁の直後まで戻ってくる。このチョーキングキャビは弁の排出係数の減少を観察することで評価される⁽⁵⁾。

圧力レリーフ弁では、チョーキングキャビ状態を設計ポイントに用いるのはおおむね適切である。通常、レリーフ弁はまれにしか作動しないのでエロージョンは問題視されない。もし1時的な振動/騒音が許容され、チョーキングやスーパーキャビテーションが認められるならレリーフ弁の必要最小寸法はミニマムにできる。また装置の設計が適切ならばスーパーキャビ状態でもエロージョン無しに連続運転が可能であるが、気泡崩壊の起きる下流ではエロージョンの恐れが残る。

< 実験データの取得 >

キャビテーションの許容レベルが確定したら、次は対象弁に関する実験データを得ることである。一般にデータ源としては次の3つがある。

- ①実装置と等価な条件下でおこなわれた実弁テスト
- ②モデル弁テスト
- ③文献からの有用データ

①はもちろんベスト。②は運用次第でベストに近くなる。③は注意深くデータを選んで適用することで約10%内の精度が得られる。ここでは幾つかの一般弁形式について実験データを示し、それをいかにスケール調整するかを論じる。

文献に見られるデータは同じ研究者であっても**食い違い(バラツキ)**がある。この理由として

- ① 本来キャビテーションの過程がランダムプロセスで、キャビ限界値のセットが難しいこと、
- ② 弁サイズ/運転圧力/空気含有量の変化によるスケール効果があること、
- ③ 同一タイプでも弁体のディテールなどにバリエーションがあること

が挙げられる。①については限界値サーチのテクニックを洗練すべき。③については構造を考えデータを綿密にグルーピングする。②については**適正なスケール効果調整**を行う。

< キャビテーション実験データ >

弁のキャビテーション特性の実験研究はCSUで8年間、MWDで数年来続けられてきた。ここで示されるデータはCSUとMWDの成果を合わせたもの。以下、各キャビレベルについてこれを示す。

まず、**初生キャビテーションデータ**について。初生キャビを発生を限界にするのは過度に保守的な設計と考えられる。故に特定の弁に限り評価されている。**Table 1**にその典型的なデータを示す。表中の排出係数 C_d は次のように定義される。

$$C_d = V / (2 \Delta P / \rho + V^2)^{0.5} \quad \text{-----(1)}$$

ここで V = 弁入口の平均管内流速、 ΔP = 弁前後の正味の圧力降下、 ρ = 液体の質量密度

圧力降下 ΔP は、弁の上流[1x口径]のポイントと弁の下流[10x口径]のポイントの間で計測された差圧から、弁のない場合の管摩擦抵抗損失を差し引いて計算されている。

キャビテーション係数は次のように定義される。

$$\sigma = (P_d - P_v) / (P_u - P_d) \quad \text{-----(2)}$$

ここで P_d = 弁の下流[10x口径]のポイントで計測されたものを管の抵抗損失で調整したもの。

P_u = 弁の上流[1x口径]のポイントで計測されたものを管の抵抗損失で調整したもの。

P_v = 液の飽和蒸気圧

($\Delta P = P_u - P_d$ の関係になるので、 $\sigma = (P_u - \Delta P - P_v) / \Delta P$ でも表現できる。)

なお、 P_d , P_u , P_v とも大気圧を原点としたもの（いわゆるゲージ圧）。 P_v は通常マイナスになる。

Table 1 では初生キャビを $\sigma \rightarrow \sigma_i$ で表示してある。また与えられた上流圧力 P_u に対して初生キャビを生じる流速は V_i として表示される。この V_i はスケール効果の調整を行う場合に用いられる。

次に「**限界キャビテーションデータ**」について。弁の場合、限界キャビテーションデータが最も重要である。類似の Leaf design(弁体形状)を持った5つのサイズのバタフライ弁の限界キャビの実験データ (σ_{co} , V_{co}) を Table 2 のコラム 5、6 に示す。コラム 7、8 の調整値は後述する。

類似構造で異なるサイズの4つのボール弁の限界キャビテーションデータを Table 3 に示す。これらの弁は全て **reduced port** を持ったソリッドの球形プラグを有している。プラグを貫通する孔は管径の75%である。面積の絞りは弁箱の滑らかなテーパによっている。全開状態で弁はベンチュリのような形をしている。そのほかの幾つかの弁タイプについては Table 4 にデータを示す。

弁の形状はキャビテーション特性に大きく影響するので Table 4 の幾つかのタイプについて簡単に説明を付しておく。コーン弁はテーパ状の円錐プラグを持っている。全開時は管断面積と同じ断面積となる。スケルトンコーン弁は部分開のとき、メインポートと同じくプラグ側を流れるように作られている。スケルトンボール弁はプラグの外側に水が流れることが出来る点でスケルトンコーン弁に似ている。そのプラグは直角面で2つのパイプセクションから製作されている。パイプのひとつは他をパススルーしてオープンしメインパイプと同じ径になる。他のパイプは端で閉じられシールとして働く。ディスク弁は涙孔形にカットされたオリフィスをもつ大きなかなり薄いプレートからなっている。このプレートは管をよぎって回転しオリフィスの面積が変化する。この弁が全開すると流路はパイプと同径になる。

バタフライ弁/グローブ弁/パルトンニードル弁は一般的なもので、ここで説明する必要もないだろう。

次に「**初生損傷キャビテーションデータ**」について。キャビテーションの発生そのものをのっけから排除してキャビ損傷の懸念を消そうとする傾向が強いが、それは過度に安全な設計になる。最近のスタディではキャビテーションによる損傷の発生の可否を求めようとする試みが見られる。その場合、たとえキャビがおきても損傷しないような設計上の規準の確立が望まれる。CSU のスタディは、管路中にオリフィスを設けた急拡エネルギー消散器に関する初生損傷とスケール効果の規準の確立に向けられてきた。76.2インチパイプに挿入された種々のオリフィスサイズについての初生損傷データ (σ_{id}) を Table 5 に示す。このデータは上流圧力 $P_u = 48.3 \text{ N/cm}^2$ のときのものである。

次にチョーキングキャビテーションデータについて。いくつかのチョーキングキャビテーションデータを **Table 6** に示す。コラムの C_d 値は 非チョーク状態のものである。弁がチョークすると (フラッシュして通路を塞ぎ) 明らかに C_d 値は衰えるから計算上チョーキング時の C_d は用いられない。異なるタイプの σ_{ch} vs C_d データを比べてみると初生キャビあるいは限界キャビのそれよりやや差異が大きくなっている。これは初生キャビに比べ明らかにチョーキングキャビの方が弁の幾何形状に依存する度合いが大きいからである。従って **Table 6** のチョーキングキャビの限界はあくまで見積用に用いることをお勧めする。幾何形状の影響によってこれらのデータから大きく外れる恐れがあるからである。詰まる所、実際の弁ないし形状的に類似したモデルを用いてデータを採取するのが望まれる。

< 実験データの分析 >

キャビテーション実験データを適正に運用するにはスケール効果についての調整が必要である。過去数年間の CSU のキャビテーション研究の多くは弁サイズと圧力の変化に伴うスケール効果の評価を行うことであった。

圧力スケール効果について。任意のキャビテーション限界で評価されるキャビテーション係数 [(2)式] は いろんな形で扱える。ひとつのバリエーションとして(☆2)

$$V_c = C(P_d - P_v)^{0.5} \quad \text{-----(3)}$$

V_c の値が基準圧力について既知の場合、任意の P_d (または P_u) に対する V_c 値を予測する上で便利なように定数 C を広げることで、この式は変更できる。乗数 0.5 は式操作からでたものであるがこの場合、圧力スケールがないことを意味している。

広汎な圧力範囲でテストされた種々のタイプ/サイズの弁の多数の実験データを元にして圧力スケール効果を調整する次の実用関係式が得られている。この式は限界キャビ状態のデータから得られているが初生キャビ、初生損傷にも十分適用可能である (ただ、それぞれの N, M 値は異なるので念為)。

$$V_c = V_{co} \{(P_u - P_v) / (P_{uo} - P_{vo})\}^N \quad \text{-----(4)}$$

$$\text{あるいは} \quad V_c = V_{co} \{(P_d - P_v) / (P_{do} - P_{vo})\}^M \quad \text{-----(5)}$$

サフィックス “o” は実験データを意味し **Table 2,3** のコラム 4~6 のようなデータを指す。乗数 N および M は幾つかの弁タイプについて評価されており **Table 7** のようになる。この N, M の値がどれ程理論値 0.5 からズレるかが、圧力スケール効果の目安になる。

オリフィスの場合は N, M は 0.5 で、初生キャビ限界に対して殆ど圧力スケール効果がないことを示している。またペルトンニードル弁は $N=0.46$ であって圧力スケール効果は軽微である。これと対照的に、バタフライ弁は 0.39 と圧力スケール効果が著しい。他の弁は 0.39~0.5 の中間にくる。

(4)式と(5)式のいずれをとるかは、使用データの如何、あるいは計算都合による。式(4)(5)の導入と応用については文献(1)参照。

初生損傷に関する圧力スケール効果は今 NFS 援助のもとで CSU で今評価中である。最新の有効データは文献 2 に示される。現状までのデータは円形鋭角縁オリフィスにのみ得られている。任意の開口比について $N=0.45$ であってこれは管サイズに依存しない。このように急拡大部の圧力スケール効果は軽微である。

この初生損傷におけるスケール効果データを弁に適用するのはデータの外挿が必要だろう。外挿に伴う不確かさを考慮して次のようなことが提案できる。

オリフィスの初生キャビ/限界キャビレベルについて $N=0.5$ 、初生損傷キャビレベルについて $N=0.45$ であるから、初生損傷に関するスケール効果の方が大きいと予想される。また弁の場合は常にオリフィスより N 値は小さいので弁における初生損傷に対する圧力スケール効果は恐らく初生キャビ/限界キャビよりやや大きくなると予想される。かかる所から、**初生損傷については Table 7 の乗数から 0.05 を減じて適用しても良いと思われる**。もちろん CSU のスタディが進めばこれより正確なものがでてくるだろう。

チョーキングについての圧力スケール効果も幾つかのバルブでスタディされている。スタディの結果では**殆ど圧力スケール効果が見られない**。この結果はチョーキングが主に平均流れのパラメータであり乱流の度合いや空気含有の度合いが余り効かないと思われるので妥当な結果だろう。

サイズスケール効果について。キャビテーションに詳しい人なら、同じ運転圧力、同じキャビ係数であっても大径弁の方が小径弁よりキャビの強さが大きいことを知っている。大径弁は試験設備の制約があって小径弁の方が試験しやすい事情があるので、このサイズスケール効果の方が圧力スケールの場合より深刻である。わずか数 cm 径の弁から 1m 径の弁の挙動を予測するには、かなりのスケール調整が必要になるだろう。

CSU の試験では 50~610mm の口径についてスケール効果式が導かれた。小型弁から大径弁へのスケールデータを得るには次式を用いる。

$$V_c = 0.94V_{co} \{1 - \text{Log}_{10}(D/d_o)/10^x\} \quad (\text{但し } x = 0.40 - 0.52\text{Log}_{10}C_d) \quad \text{-----}(6)$$

ここで、 V_{co} =実験による小型弁の限界流速、 D =大型弁の口径、 d_o =小型弁の口径

この式は任意の排出係数 C_d のにおける大径弁の V_c を予測するもので、初生キャビにも適用できる。

(6)式とは逆に、**大型弁から小型弁のスケールデータを導く場合には次式を用いる**。

$$V_c = 1.06V_{co} \{1 - \text{Log}_{10}(D/d_o)/10^x\} \quad (\text{但し } x = 0.40 - 0.52\text{Log}_{10}C_d) \quad \text{-----}(7)$$

この式で、 V_{co} =実験による大型弁の限界流速

(6)(7)式は多数のデータを使用して導かれており正確なスケールデータと考えられる。**約 0.7 以上の C_d についてはこれは保守的な値になると思われるが、全開時に C_d が 0.7 以上になる弁は殆どなくこのレンジでの式の妥当性はチェックできない**。

初生損傷についてのサイズスケール効果はまだ不明。CSU のスタディの進展が待たれる。

チョーキングキャビテーションのデータは限られているが圧力スケール効果と同様に、サイズスケール効果の影響は殆どないだろう。

<スケール効果式のアプリケーション>

限界/初生キャビに関するスケール効果式の精度は Table1~4 にリストされた実験データを調整することで証明できる。弁の状態が類似しているなら調整データも類似する筈である。このような比較は

Table 2 の 6 つのバタ弁と 4 つのボール弁についてコラム 3～7 の実験データを用いて実行できる。これらの表では対象弁の形状は類似している。まず比較のベースとしてボール弁の未調整実験値を C_d について Fig.1 にプロットしてみた。高い σ_c 値をもつ大径弁ではバラツキが大きいのがわかる。

Table 2,3 のコラム 7,8 にリストされるデータは、次の(4),(6)式を結合した式から得られている。

$$V_c = 0.94 V_{co} \left\{ (P_u - P_v) / (P_{uo} - P_{vo}) \right\}^N [1 - \text{Log}_{10}(D/d_o) / 10^x] \quad (\text{但し } x = 0.40 - 0.52 \text{Log}_{10} C_d) \dots \dots \dots (8)$$

Table 3 のボール弁データは弁サイズ 305mm、圧力 41.4N/cm² で調整されている。調整値 σ_c (コラム 7) を Fig.2 にプロットする。データのバラツキは予想平均線の約 16% 以下である。その誤差量ではキャビテーションレベルを大きく変えることはない。

C_d が 0.7 を越えると、小型弁の調整データが大径弁の計測値を超える傾向がみられる。しかしその限界値の設定にはあいまいがありまたキャビの度合いも小さいので、Table 3 のデータとスケール効果式の使用は、ソリッドプラグボール弁に対し十分に精度のいい結果を与えるだろう。

Table 2 のバタ弁データをプロットしても同じような比較が出来る。これらの弁では調整データにややバラツキが多くなる。これはバタ弁形状のバリエーションが大きいからである。

広範囲に変化する 4 つのシート/ディスク形状を持つ 8 サイズのバタフライ弁については文献(3)で包括的に比較される。その解析結果では Table 1,2 のような実験データをスケール調整して任意の従来型バタフライ弁のキャビ係数 σ_i, σ_c が約 20% の精度で予測できる。即ち、限界流速 V_i, V_c について約 10% の誤差になる。もしそれ以上の精度が欲しいのなら実験確認が望ましい。

この種のタイプの結果は注意して観察する必要がある。例えば Table 4 にリストされる 2 つの 610mm コーン弁を比べてみると、スケルトンプラグ弁の小さい C_d 値における σ_c 値はスカート弁のそれより 90% 程度大きい。また別の例では急拡部分に排出されるペルトン形ニードル弁のシート設計の変更による効果が挙げられる。シート近傍の形状変更によって同じ C_d 値に対し σ_c が 160% アップした。キャビテーションに関して形状変更の影響が如何に大きいかわかるべきである。

< 例 題 >

例題によって、サイズ効果/圧力効果を調整しない場合に大きな誤差がでることを強調しておく。またキャビテーションデータの適用性を証明する。

[例題 1] 上流圧力 P_u が 40N/cm² のパイプラインの隔離弁として 2m 径のバタフライ弁を設置する。弁は全開で運転される。弁が限界キャビ以下で運転されるとして限界流速を求めよ。なお、飽和蒸気圧は -8.96N/cm² とする。

このバルブのプロトタイプは Table 2 の ϕ 305 弁に類似しているので、サイズの違いはさておいて ϕ 305 弁のデータを用いてみる。Table 2 より

$$VO = 90^\circ, \quad C_d = 0.824, \quad P_{uo} = 29.6 \text{ N/cm}^2, \quad P_{vo} = -7.93 \text{ N/cm}^2, \quad \sigma_{co} = 11.7, \quad V_{co} = 11.2 \text{ m/s}$$

$$d = 0.305 \text{ m}, \quad N = 0.39$$

(8)式を用いて、

$$x=0.40-0.52\text{Log}_{10}C_d=0.4-0.52\text{Log}_{10}0.824=0.4437$$

$$V_c=0.94\{(P_u-P_v)/(P_{u0}-P_{v0})\}^N[1-\text{Log}_{10}(D/d_0)/10^x]$$

$$=0.94x11.2x\{(40+8.96)/(29.6+7.93)\}^{0.39}[1-\text{Log}_{10}(2/0.305)/10^{0.4437}]=8.24\text{m/s}$$

サイズスケール効果を見捨てて 限界キャビ係数 $\sigma_{co}=11.7$ を Fix して計算してみる。(2)式を変形して

$$P_d=(\sigma P_u+P_v)/(1+\sigma)=(11.7x40-8.96)/(1+11.7)=36.145\text{ N/cm}^2$$

ついで(1)式を変形して

$$V=[\{C_d^2/(1-C_d^2)\}2\Delta P/\rho]^{0.5}$$

ここで、 $\Delta P=P_u-P_d=40-36.145=3.855$ 、 $C_d=0.824$ 、 $\rho=1000\text{ Ns}^2/\text{m}^4$ であるから

$$V=[\{0.824^2/(1-0.824^2)\}x2x3.855x10^4/1000]^{0.5}=12.8\text{ m/s}$$

なお $V=V_c$ である。これは調整データ 8.24m/s より 55%高い。もしこれを設計流速とするなら、きついキャビテーションを引き起こすことになる。

【例題 2】 $\phi 305$ ボール弁が高圧設備の減圧用に用いられる。キャビテーションレベルがどの辺にあるか知りたい。弁設備の要目は

$$P_u=175\text{N/cm}^2、P_d=125\text{N/cm}^2、P_v=-7.93\text{N/cm}^2、V=3.1\text{m/s}、C_d=0.0975、\sigma=2.29$$

ボール弁については限界キャビ(Table 3)とチョーキングキャビ(Table 6)のデータがあるが、ここでは限界キャビを考えて、Table 3 のコラム 7,8 にリストされる 305mm ボール弁データを用いる。なお、コラム 5,6 は用いない。何故なら $C_d=0.0975$ のデータはないので内挿(中間補完)を行うが、コラム 5,6 のデータの P_u は同じでないので、同じ P_u で調整済みのコラム 7,8 を使用した方が理に合うと思われるからである。コラムデータ 5,6 のデータを中間補正して

$$D=\phi 305\text{mm}、C_d=0.0975、P_u=41.4\text{N/cm}^2、P_v=-7.93\text{N/cm}^2$$

$$V_c=1.21+\{(0.0975-0.065)/(0.112-0.065)\}x(1.94-1.21)=1.71\text{m/s}$$

$$VO=30+\{(0.0975-0.065)/(0.112-0.065)\}x(40-30)=37^\circ$$

$$\sigma_c=1.88+\{(0.0975-0.065)/(0.112-0.065)\}x(2.37-1.88)=2.22、$$

このデータは $\phi 305\text{mm}$ であるからサイズスケール調整は不要であるから圧力スケールの(4)式を用いる。なお、 $P_{u0}=P_u=41.4$ 、 $P_{v0}=P_v=-7.93$ 、 $V_{co}=V_c=1.71$ とおいて、 $N=0.4$ とすると

$$V_c=V_{co}\{(P_u-P_v)/(P_{u0}-P_{v0})\}^N=1.71x\{(175+7.93)/(41.4+7.93)\}^{0.4}=2.89\text{m/s}$$

(1)式を変形して $\Delta P=P_u-P_d=\{(1-C_d^2)/(2C_d^2)\}\rho V^2$ 、ここで $V=V_c=2.89$ として

$$P_u-P_d=\{(1-0.0975^2)/(2x0.0975^2)\}x1000x2.89^2=43.51$$

$$\text{よって } P_d=P_u-43.51=175-43.51=131.49$$

従って $\sigma=(P_d-P_v)/(P_u-P_d)=(131.49+7.93)/43.51=3.21$

σ はここでは限界 σ_c である。 $[\sigma_c=3.21] > [\sigma=2.29]$ であるので、この弁は限界キャビテーションより高いレベル(安全側)で運転されることになる。もし圧力スケール効果を見捨てると、Table 3 のコラム 5 の実験データより $\sigma_c=2.33$ と予想され上記の σ_c の予想値 3.21 の 38%の誤差を生じることになる。

【例題 3】 $\phi 105\text{mm}$ のボール弁を圧力レリーフ用に用いる。ライン圧力は 50 N/cm^2 で背圧 5 N/cm^2 のタンクに排出される。その場合のキャビテーションの度合い及び排出量をもとめよ。なお、ボール弁は

90° 開で使用され、液の飽和蒸気圧は -8.96 N/cm^2 である。

弁のタイプは Table 6 にリストされる 51mm のボール弁と同じタイプと仮定する。キャビの度合いを求めるため設備の σ を計算して種々のキャビ限界と比べる。

$$\sigma = (P_d - P_v) / (P_u - P_d) = (5 + 8.96) / (50 - 5) = 0.31$$

51mm 弁/90 度開の場合、Table 6 のコラム 5 より $\sigma_{ch} = 4.15$ である。 $\sigma_{ch} > \sigma$ であるのでこの弁はチョーキング域を超えてスーパーキャビテーション域で運転される。

Table 6 の 90° 開では、 $P_u = 46.4 \text{ N/cm}^2$ 、弁の通過流速は 20 m/s である。一般にチョーキング状態では圧力スケール効果は殆どない。また、サイズスケール効果も然り。従って前述の圧力スケール効果の項で述べたように $N = 0.5$ になる。(4)式を用いて、

$$V_c = V_{co} \{ (P_u - P_v) / (P_{uo} - P_{vo}) \}^N = 20 \{ (50 + 8.96) / (46.4 + 8.06) \}^{0.5} = 20.8 \text{ m/s}$$

となる(余り流速は変わらない)。従って、排出流量 Q_d は

$$Q_d = V_c A_d = 20.8 \times (\pi \times 0.105^2 / 4) = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

なお、Table 6 の 90° 開では $C_d = 0.808$ になっているがこれはチョーキングが起きていないときのものでチョーキング/スーパーチョーキングではこれは使用できない。もしこの係数を用いるなら(2)式より

$$V = [\{ C_d^2 / (1 - C_d^2) \} (2 \Delta P / \rho)]^{0.5} = [\{ 0.808^2 / (1 - 0.808^2) \} (2 \times 45 \times 10^4 / 1000)]^{0.5} = 41 \text{ m/s}$$

従って $Q_d = V A_d = 41 \times \pi \times 0.105^2 / 4 = 0.355 \text{ m}^3/\text{s}$ 即ち 98% 増しになる。

< 結 論 >

- (1) 初生、限界、初生損傷およびチョーキングの各キャビテーションレベルは設計に適切な規準を与える。騒音、振動損傷が許されない所には初生キャビテーションが適用される。低騒音、軽度なキャビ、軽微な損傷がゆるされる所では限界キャビテーションが適用できる。騒音や振動は認められるが、エロージョンによる損傷が避けられない所では初生損傷ステージが望ましい。チョーキングレベルは高い騒音、重度な振動あるいは損傷の可能性が問題視されない所に適している。またチョーキングは主に操作周期が長く間歇的な作動に適する。
- (2) Table に与えられる実験データは、圧力/サイズによるスケール効果を調整すれば弁のキャビの予測に使用できる。
- (3) “類似の弁” に Table データを適用するときは注意が要る。ニードル弁のシート形状あるいはコーン弁の Skirted vs non-skirted design のような設計バリエーションの中にはキャビの初生に少なからず影響を及ぼすものがある。
- (4) バタフライ弁や球形プラグを持ったボール弁について、本論文のデータは、実際流量(流速)の約 10% の誤差内で初生/限界キャビテーションの予測に適用できる。
- (5) 圧力/サイズによるスケール効果を調整しないで、そのままの実験データを用いると例題に示したようにならかなりエラーがでる。

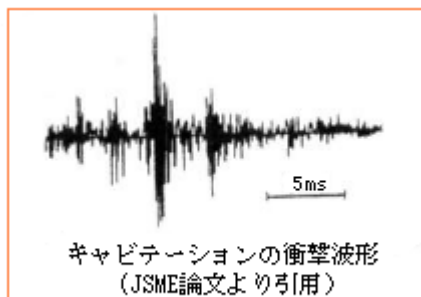
- (6) 弁やオリフィスのテストから導出した式を用いて種々のタイプの弁や急拡構造(オリフィス類)の圧力/サイズのスケール効果調整を行うことができる。
- (7) 本論文で、弁の初生/限界キャビ状態および急拡構造の初生損傷について圧力スケール効果が定義された。但し、弁の初生損傷データがでるまではその適用につき注意すること。
- (8) 本論文で、弁および急拡部分の初生/限界キャビについて、サイズスケール効果が定義された。ただ初生損傷のサイズスケール効果を定義できるような有効なデータは殆どない。
- (9) チョーキングキャビテーションでは圧力スケール効果は殆どない。また限定データながら、サイズスケール効果は存在しないようである。

1. TULLIS, J. P. Cavitation scale effects for valves. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, July 1973, Vol. 99, No. HY7, Proc. Paper 9874, pp. 1109-1128.
2. BALL, J. W. and SWEENEY, C. E. Incipient cavitation damage in sudden enlargement energy dissipators. Accepted by The Institution of Mechanical Engineers for the Fluid Machinery Group Conference "Cavitation," Sept. 3-5, 1974 at Heriot-Watt University, Edinburgh.
3. BALL, J. W. and TULLIS, J. P. Cavitation in butterfly valves. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Sept. 1973, Vol. 99, No. HY9, Proc. Paper 9993, pp. 1303-1318.
4. TULLIS, J. P. Choking and supercavitating valves. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Dec. 1971, Vol. 97, No. HY12, Proc. Paper 8593, pp. 1931-1945.
5. TULLIS, J. P. Testing valves for cavitation. Accepted by The Institution of Mechanical Engineers for the Fluid Machinery Group Conference "Cavitation" Sept. 3-5, 1974 at Heriot-Watt University, Edinburgh.

引用文献

脚注 (By N.M) :

(☆1) 初生キャビテーションが発現したときの加速度計の波形。



(☆2) (2)式を変形して、 $\sigma \Delta P = P_d - P_v$ 、ここで ΔP は(1)式を変形して $\Delta P = \{(1 - C_d^2)/(2C_d^2)\} \rho V^2$ 、これを代入して $\sigma \{(1 - C_d^2)/(2C_d^2)\} \rho V^2 = P_d - P_v$ 更にこの式を変形して

$$V = [(1/\sigma / \rho) \{(2C_d^2)/(1 - C_d^2)\}^{0.5} (P_u - P_v)^{0.5} = C(P_u - P_v)^{0.5}$$

ここで $C = [(1/\sigma / \rho) \{(2C_d^2)/(1 - C_d^2)\}^{0.5}$ であるが、同一キャビを想定すれば $\sigma = \text{const}$ 。また同一絞りとすれば $C_d = \text{const}$ 、また $\rho = \text{const}$ であるから 実験データを他の P_u に転用する上で

$C = \text{const}$ と考えてよい。但しこの式はスケーリングがない場合にのみ成立する。現実の限界速度 V は変動するので、 C が定数であるという蓋然性をキープするなら乗数 0.5 を Modify するしかない。即ち

$$V = C(P_u - P_v)^N \quad (N = 0.5 \text{ 以下のベキ乗数で、実験データより設定})$$

Table 1
Incipient cavitation data for butterfly valves

| Valve Size mm | VO deg. | C_d | P_u N/cm ² | σ_i | V_i m/sec |
|---------------|---------|--------|-------------------------|------------|-------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 102 | 20 | 0.083 | 27.0 | 1.58 | 1.37 |
| | 30 | 0.162 | 15.5 | 1.21 | 2.29 |
| | 40 | 0.257 | 26.9 | 3.02 | 3.51 |
| | 50 | 0.334 | 46.7 | 3.56 | 5.49 |
| | 70 | 0.535 | 13.9 | 4.13 | 5.85 |
| 152 | 15 | 0.040 | 33.1 | 1.27 | 0.76 |
| | 30 | 0.0956 | 51.7 | 2.30 | 1.83 |
| | 50 | 0.272 | 33.1 | 5.41 | 3.20 |
| | 60 | 0.445 | 33.1 | 7.53 | 4.88 |
| | 70 | 0.608 | 33.1 | 8.01 | 7.32 |
| | 80 | 0.727 | 33.1 | 9.45 | 9.39 |
| 305 | 20 | 0.056 | 34.5 | 1.99 | 0.94 |
| | 30 | 0.112 | 34.5 | 2.23 | 1.83 |
| | 40 | 0.171 | 34.5 | 3.00 | 2.53 |
| | 50 | 0.277 | 34.5 | 4.28 | 3.66 |
| | 60 | 0.401 | 34.5 | 6.11 | 4.79 |
| | 70 | 0.577 | 34.5 | 8.43 | 6.71 |
| 406 | 10 | 0.0274 | 71.7 | 1.67 | 0.67 |
| | 20 | 0.0975 | 55.2 | 2.63 | 1.83 |
| | 30 | 0.158 | 45.0 | 3.55 | 2.44 |
| | 40 | 0.242 | 51.8 | 5.61 | 3.35 |
| | 50 | 0.340 | 48.7 | 7.50 | 4.18 |
| | 60 | 0.505 | 36.7 | 9.61 | 5.49 |
| 508 | 20 | 0.060 | 35.9 | 2.33 | 0.98 |
| | 35 | 0.173 | 35.9 | 4.32 | 2.26 |
| | 50 | 0.360 | 35.9 | 6.60 | 4.15 |
| | 65 | 0.597 | 28.3 | 9.09 | 6.31 |
| | 80 | 0.810 | 22.1 | 16.3 | 8.14 |
| | 90 | 0.870 | 21.4 | 26.6 | 8.14 |

$$P_v = -7.93 \text{ N/cm}^2$$

Table 2
Critical cavitation data for butterfly valves

| Valve Size mm | VO deg. | Experimental Data | | | | Adjusted Data(a) | |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------------|---------------|----------------|------------------|-------------|
| | | C_d | P_{uo} N/cm ² | σ_{co} | V_{co} m/sec | σ_c | V_c m/sec |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 102 ^(b) | 20 | 0.083 | 27.1 | 1.11 | 1.52 | 2.07 | 1.71 |
| | 30 | 0.162 | 54.6 | 1.48 | 3.69 | 2.44 | 3.17 |
| | 40 | 0.257 | 26.9 | 1.67 | 4.30 | 3.55 | 4.49 |
| | 50 | 0.334 | 39.6 | 2.04 | 6.28 | 4.09 | 5.64 |
| | 60 | 0.442 | 27.0 | 2.55 | 6.92 | 5.82 | 6.79 |
| | 70 | 0.535 | 13.4 | 3.03 | 6.52 | 8.11 | 7.52 |
| | 80 | 0.619 | 26.9 | 4.55 | 8.84 | 10.8 | 8.25 |
| | 90 | 0.700 | 23.6 | 5.79 | 9.45 | 14.4 | 8.98 |
| | 152 ^(b) | 20 | 0.0590 | 63.1 | 1.64 | 1.37 | 2.09 |
| 30 | | 0.0956 | 43.4 | 1.62 | 1.91 | 2.40 | 1.87 |
| 40 | | 0.174 | 95.8 | 2.52 | 4.30 | 3.14 | 3.11 |
| 50 | | 0.272 | 33.0 | 2.81 | 4.14 | 4.82 | 4.21 |
| 60 | | 0.445 | 33.1 | 3.68 | 6.58 | 6.77 | 6.40 |
| 70 | | 0.608 | 36.2 | 4.63 | 9.60 | 8.82 | 8.77 |
| 80 | | 0.727 | 27.2 | 6.81 | 10.1 | 14.0 | 9.81 |
| 90 | | 0.775 | 22.1 | 7.93 | 10.1 | 17.0 | 10.3 |
| 305 ^(b) | | 20 | 0.056 | 34.5 | 1.02 | 1.16 | 1.46 |
| | 30 | 0.112 | 34.5 | 1.30 | 2.16 | 1.93 | 2.36 |
| | 40 | 0.171 | 34.5 | 2.22 | 2.83 | 3.11 | 3.07 |
| | 50 | 0.277 | 34.5 | 2.51 | 4.48 | 3.67 | 4.80 |
| | 60 | 0.401 | 34.5 | 3.43 | 6.10 | 4.98 | 6.40 |
| | 70 | 0.577 | 34.5 | 6.10 | 7.77 | 8.92 | 8.04 |
| | 80 | 0.781 | 30.3 | 9.67 | 10.7 | 14.7 | 11.3 |
| | 90 | 0.824 | 29.6 | 11.7 | 11.3 | 17.9 | 12.0 |
| | 406 ^(b) | 10 | 0.0274 | 71.7 | 1.67 | 0.76 | 1.77 |
| 20 | | 0.0975 | 55.2 | 1.74 | 2.40 | 2.07 | 2.01 |
| 30 | | 0.158 | 45.0 | 1.92 | 3.48 | 2.44 | 3.10 |
| 40 | | 0.242 | 51.8 | 2.71 | 5.18 | 3.31 | 4.31 |
| 50 | | 0.340 | 48.7 | 3.93 | 6.26 | 4.87 | 5.36 |
| 60 | | 0.505 | 36.7 | 4.97 | 8.35 | 6.57 | 7.62 |
| 70 | | 0.665 | 30.7 | 5.87 | 10.8 | 8.22 | 10.5 |
| 80 | | 0.810 | 19.9 | 10.2 | 11.1 | 15.4 | 12.2 |
| 90 | | 0.855 | 17.3 | 12.6 | 11.5 | 19.4 | 13.1 |
| 508 ^(b) | 35 | 0.173 | 34.5 | 2.13 | 2.96 | 2.58 | 2.92 |
| | 50 | 0.360 | 33.9 | 3.15 | 5.49 | 4.05 | 5.40 |
| | 65 | 0.597 | 27.6 | 6.39 | 7.32 | 8.40 | 7.63 |
| | 80 | 0.810 | 22.1 | 16.3 | 16.3 | 16.3 | 16.3 |
| 610 ^(c) | 25 | 0.0504 | 44.8 | 2.00 | 0.945 | 1.97 | 0.920 |
| | 30 | 0.0891 | 44.8 | 2.15 | 1.64 | 2.10 | 1.60 |
| | 35 | 0.129 | 44.8 | 2.30 | 2.33 | 2.23 | 2.27 |
| | 40 | 0.172 | 44.8 | 2.60 | 3.00 | 2.56 | 2.91 |
| | 45 | 0.224 | 44.8 | 3.30 | 3.60 | 3.25 | 3.50 |
| | 50 | 0.288 | 44.8 | 4.00 | 4.39 | 3.89 | 4.27 |
| | 55 | 0.375 | 44.8 | 4.60 | 5.58 | 4.54 | 5.40 |
| | 60 | 0.467 | 44.8 | 5.75 | 6.61 | 6.44 | 5.64 |

(a) Adjusted with Eq. 8 to $D=610$ mm, $p_u=41.4$ N/cm²

(b) $p_v = -7.93$ N/cm² (c) $p_v = -9.86$ N/cm²

Table 3

Critical cavitation data for ball valves (with solid ball)

| Valve Size mm | Experimental Data | | | | | Adjusted Data ^(a) | |
|---------------|-------------------|-------|----------------------------|---------------|----------------|------------------------------|-------------|
| | VO deg. | C_d | P_{uo} N/cm ² | σ_{co} | V_{co} m/sec | σ_c | V_c m/sec |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
| 51 mm | 30 | .039 | 51.7 | 0.60 | 1.07 | 0.97 | 0.87 |
| | 60 | .222 | 51.7 | 1.64 | 4.85 | 2.91 | 3.63 |
| | 90 | .82 | 51.7 | 6.33 | 18.3 | 14.4 | 11.5 |
| 76 mm | 60 | .202 | 40.9 | 1.46 | 4.11 | 2.47 | 3.47 |
| | 75 | .383 | 44.8 | 2.18 | 7.56 | 3.87 | 5.91 |
| | 90 | .769 | 24.5 | 4.52 | 13.0 | 9.77 | 11.5 |
| 203 mm | 40 | .104 | 68.9 | 1.45 | 2.62 | 1.68 | 2.00 |
| | 50 | .164 | 66.9 | 2.10 | 3.66 | 2.44 | 2.82 |
| | 60 | .254 | 52.4 | 2.51 | 4.88 | 3.10 | 4.08 |
| | 70 | .351 | 41.7 | 2.76 | 6.10 | 3.62 | 5.49 |
| | 80 | .500 | 34.8 | 4.12 | 7.47 | 5.57 | 7.07 |
| 305 mm | 30 | .065 | 68.9 | 2.12 | 1.45 | 1.88 | 1.21 |
| | 40 | .112 | 51.7 | 2.43 | 2.10 | 2.37 | 1.94 |
| | 50 | .175 | 55.5 | 2.92 | 3.20 | 2.75 | 2.89 |
| | 60 | .273 | 51.7 | 3.04 | 4.88 | 2.91 | 4.51 |
| | 70 | .380 | 28.6 | 3.60 | 5.18 | 3.86 | 5.85 |
| | 80 | .520 | 27.6 | 4.36 | 7.01 | 4.69 | 8.02 |
| 90 | .695 | 13.4 | 5.20 | 8.02 | 6.22 | 11.3 | |

(a) Adjusted with Eq. 8 to $D = 305$ mm,
 $P_u = 41.4$ N/cm², $P_v = -7.93$ N/cm²

Table 5 オリフィス

Cavitation limits for circular sharp-edged orifices in a 76.2 mm pipe

| Orifice to pipe diameter ratio | C_d | σ_i | σ_c | $\sigma_{id}^{(a)}$ | σ_{ch} |
|--------------------------------|-------|------------|------------|---------------------|---------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 0.389 | 0.100 | 1.09 | 0.93 | 0.42 | 0.26 |
| 0.444 | 0.135 | 1.34 | 1.06 | 0.65 | 0.33 |
| 0.500 | 0.180 | 1.62 | 1.21 | 0.76 | 0.40 |
| 0.667 | 0.379 | 3.26 | 2.17 | 1.51 | 0.78 |
| 0.800 | 0.645 | 6.64 | 4.46 | 2.96 | -- |

(a) $P_u = 48.3$ N/cm²

Table 4

Critical cavitation data for several types of valves

| Valve Type and Size | VO | C_d | P_u N/cm ² | σ_c | V_c m/sec |
|---|-----------------------------------|--------|-------------------------|------------|-------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 610 mm cone ^(a) valve with skeleton plug | 10° | 0.0334 | 105 | 2.26 | 0.887 |
| | 15 | 0.0636 | 105 | 3.02 | 1.52 |
| | 20 | 0.0836 | 105 | 3.25 | 1.95 |
| | 25 | 0.109 | 105 | 3.38 | 2.51 |
| | 30 | 0.138 | 105 | 3.57 | 3.12 |
| | 40 | 0.219 | 105 | 4.69 | 4.51 |
| 610 mm cone ^(a) valve with skirted plug | 10° | 0.0414 | 105 | 1.35 | 1.30 |
| | 15 | 0.0574 | 44.8 | 1.41 | 1.23 |
| | 20 | 0.0727 | 44.8 | 1.56 | 1.51 |
| | 25 | 0.0918 | 44.8 | 1.67 | 1.87 |
| | 30 | 0.115 | 44.8 | 1.88 | 2.26 |
| | 40 | 0.170 | 44.8 | 2.24 | 3.17 |
| 406 mm ball ^(b) valve with skeleton plug | 8.6° | 0.074 | 40.0 | 1.57 | 1.46 |
| | 31 | 0.254 | 48.3 | 3.29 | 4.33 |
| | 40 | 0.351 | 24.1 | 3.02 | 4.88 |
| | 49 | 0.463 | 24.1 | 3.13 | 6.71 |
| | 58 | 0.585 | 24.1 | 6.15 | 7.04 |
| | 67 | 0.728 | 24.1 | 10.3 | 8.23 |
| 203 mm disc ^(b) valve | 10° | .0100 | 55.8 | 1.0 | 0.25 |
| | 20 | .0528 | 55.2 | 1.75 | 1.13 |
| | 30 | .125 | 51.8 | 2.1 | 2.47 |
| | 50 | .456 | 44.8 | 4.2 | 7.30 |
| | 60 | .650 | 41.4 | 5.5 | 10.5 |
| | 305 mm globe ^(b) valve | 10° | 0.023 | 41.4 | 1.4 |
| 20 | | 0.070 | 44.8 | 1.7 | 1.39 |
| 30 | | 0.160 | 44.8 | 2.3 | 2.90 |
| 40 | | 0.220 | 43.4 | 2.70 | 3.76 |
| 60 | | 0.296 | 42.0 | 3.30 | 4.73 |
| 80 | | 0.334 | 41.4 | 3.80 | 5.08 |
| 203 mm pelton ^(b) needle valve (seat dia. = 108 mm exp. dia. = 356 mm) | 8° | 0.036 | 44.8 | 0.40 | 0.99 |
| | 13 | 0.052 | 44.8 | 0.55 | 1.36 |
| | 23 | 0.078 | 44.8 | 0.70 | 1.95 |
| | 53 | 0.146 | 44.8 | 1.11 | 3.30 |
| | 83 | 0.200 | 44.8 | 1.40 | 4.28 |
| 254 mm globe ^(a) valve | 35° | 0.084 | 105 | 2.18 | 2.25 |
| | 40 | 0.126 | 105 | 2.36 | 3.29 |
| | 50 | 0.179 | 105 | 2.52 | 4.60 |
| | 60 | 0.253 | 105 | 2.80 | 6.37 |
| | 70 | 0.322 | 105 | 2.97 | 8.11 |
| | 100 | 0.405 | 105 | 3.20 | 10.2 |

(a) $P_v = -9.86$ N/cm² (b) $P_v = -7.93$ N/cm²

Table 6

Choking cavitation data for valves

| Valve Type and Size | VO | C _d ^(a) | P _u ^(a) N/cm ² | σ _{ch} ^(b) | V _{ch} m/sec |
|------------------------|-------|-------------------------------|--|--------------------------------|--------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
| 51 mm ball valve | 30° | 0.0381 | 66.6 | 0.0415 | 1.44 |
| | 40 | 0.0768 | 140.0 | 0.119 | 3.96 |
| | 50 | 0.134 | 61.2 | 0.218 | 4.58 |
| | 60 | 0.224 | 65.8 | 0.355 | 7.58 |
| | 70 | 0.350 | 95.9 | 0.670 | 13.2 |
| | 80 | 0.589 | 100.0 | 2.09 | 19.3 |
| 90 | 0.808 | 46.4 | 4.15 | 20.0 | |
| 102 mm ball valve | 30° | 0.0355 | 165. | 0.053 | 2.04 |
| | 40 | 0.0740 | 149. | 0.120 | 3.95 |
| | 50 | 0.136 | 63.2 | 0.229 | 4.69 |
| | 60 | 0.220 | 55.2 | 0.334 | 6.95 |
| | 70 | 0.356 | 19.8 | 0.704 | 6.89 |
| | 80 | 0.565 | 27.3 | 1.72 | 11.1 |
| 85 | 0.721 | 21.0 | 3.58 | 11.8 | |
| 76 mm globe 100% valve | | 0.369 | 55.1 | 0.224 | 12.6 |
| 76 mm gate valve | 42% | 0.145 | 67.6 | 0.391 | 4.84 |
| | 50 | 0.322 | 55.1 | 0.684 | 9.33 |
| | 75 | 0.691 | 34.6 | 1.28 | 18.5 |
| | 92 | 0.833 | 23.3 | 1.91 | 22.1 |
| 152 mm bfly. valve | 30° | 0.109 | 66.9 | 0.345 | 3.65 |
| | 50 | 0.337 | 52.7 | 0.714 | 9.54 |
| | 60 | 0.500 | 40.4 | 0.993 | 12.7 |
| | 70 | 0.709 | 26.6 | 1.77 | 15.9 |
| | 90 | 0.874 | 16.0 | 3.80 | 18.0 |
| 254 mm bfly. valve | 20° | 0.050 | 44.7 | 0.299 | 1.43 |
| | 30 | 0.145 | 45.5 | 0.356 | 4.14 |
| | 40 | 0.253 | 39.4 | 0.434 | 6.73 |
| | 50 | 0.387 | 24.2 | 0.665 | 8.55 |
| | 60 | 0.556 | 15.8 | 1.53 | 9.21 |
| | 70 | 0.731 | 9.24 | 3.12 | 9.82 |

(a) C_d calculated for nonchoking conditions.
 (b) σ_{ch} based on p_v = -8.06 N/cm²

Table 7

Exponents for use in pressure scale equations (Eq. 4, 5 and 8)

| Valve Type | N | M | Pressure ^(a) N/cm ² |
|---------------------------------|------|------|--|
| (1) | (2) | (3) | (4) |
| Butterfly (av. of 7 valves) | 0.39 | 0.36 | 8 to 190 |
| Ball and Cone (av. of 5 valves) | 0.40 | 0.37 | 10 to 170 |
| Globe | 0.46 | 0.43 | 45 to 134 |
| Pelton Needle | 0.46 | 0.43 | 45 to 103 |

(a) Range of p_u used in experimental study.

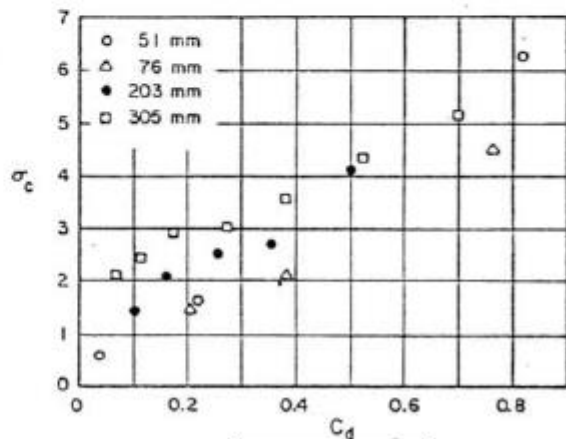


Figure 1

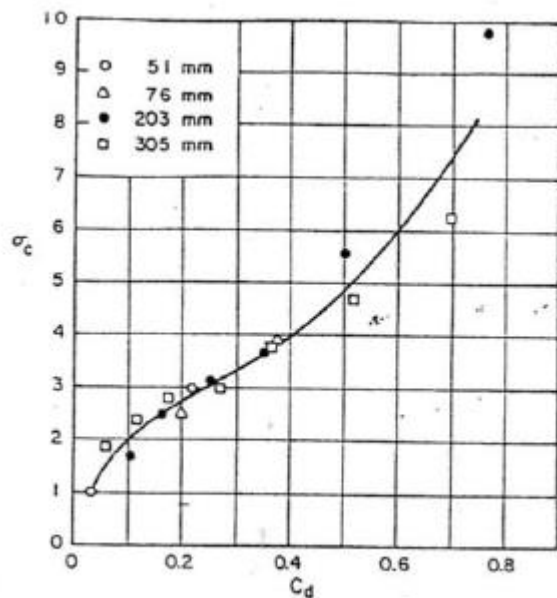


Figure 2