

I-26 引張力を受ける鋼管の圧壊強度について

北海学園大学 正会員 当麻 庄司

1. 序言

鋼管が外側から圧力を受けた時、最大耐えることのできる圧力のことを圧壊強度というが、この圧壊強度は、鋼管が内圧を受ける場合とは違って、いろいろな要素によって影響を受ける。圧壊強度の問題は、圧縮部材の問題と対応させて考えると理解しやすい。即ち、鋼管が外圧を受ける場合には、材料の強度の外に、圧縮部材が細長比や真直度 (out-of-straightness) のような寸法的要素によって大きくその耐荷力は影響を受けるように、鋼管もその径厚比 (D/t) や偏平度 (out-of-roundness) によって圧壊強度は大きく変化する。

このような鋼管の圧壊強度は、従来から理論的にも実験的にも広く研究されてきて、これらは参考書や設計指針¹⁾の中にとめられている。

最近では、大量の鋼管が海底油田の生産のために油井管やラインパイプとして、大きな外圧と共に軸引張力も同時に作用するという非常に厳しい条件下で使用されるようになってきた。それに伴って、従来の鋼管圧壊強度に対する研究に軸引張力の影響ととり入れようとした研究が、鋼管メーカーや石油会社を中心に活発化してきている。本論文はこのような中で、引張力を受ける鋼管の圧壊強度について、引張力による軸方向引張応力と外圧による周方向圧縮応力との2軸応力状態下の現象を、理論的に考察しようとするものである。なお、鋼管の圧壊強度に大きな影響を与える偏平度については別途考えることとし、ここでは真円の鋼管についての圧壊強度を論ずることとする。

2. 鋼管圧壊強度の分類

鋼管の圧壊形態を考えてみると、柱の座屈と同じように塑性域と弾性域に分類することができる。この時のパラメーターとしては鋼管の径厚比 D/t が用いられ、 D/t の値が小さい時塑性座屈が生じ、 D/t の値が大きい時弾性座屈が生じる。塑性域における圧壊強度を理論的に定義するために Lamé の弾性解を用いて、管壁の内表面に生じる最大応力が降伏応力に達した時の圧力とすることができ、これは次式のように表わされる。

$$p_{cr,p} = 2 \sigma_y \frac{D/t - 1}{(D/t)^2} \quad (1)$$

ここに、 $p_{cr,p}$ = 鋼管の塑性圧壊強度、 D = 鋼管の外径、 t = 鋼管の板厚、 σ_y = 降伏応力

一方、 D/t の値が大きい時の弾性圧壊強度は、Clindinst が求めた次の座屈条件式を用いることができる。

$$p_{cr,E} = \frac{2 E}{(1 - \nu^2) D/t (D/t - 1)^2} \quad (2)$$

ここに、 $p_{cr,E}$ = 鋼管の弾性圧壊強度、 E = 弾性係数、 ν = ボアソン比

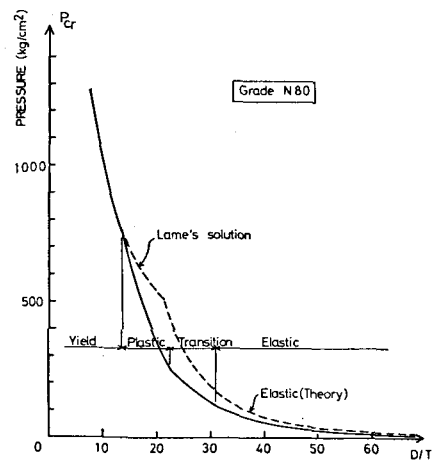


Fig. 1 API Collapse Strength of Steel Pipes

Fig. 1 中の点線は、式(1)と(2)で表わされる鋼管の圧壊強度と D/t の関係をグレード N80 ($\sigma_y = 56 \text{ kg/mm}^2$) の油井管について、示したものである。

理論的には以上のように塑性域と弾性域の2つに分かれるが、現実の設計においては柱部材の設計においてもそうであったように、塑性域から弾性域に移り変わる範囲が問題となり、この範囲は実験的に定められる。API (American Petroleum Institute) ではこの部分を Plastic range と Transition range の2つによって表わすこととし、先の塑性域と弾性域はそれぞれ Yield range と Elastic range と称し、以上4領域に分類して鋼管の圧壊強度を表わしている。Fig. 1 中の実線は、API の設計圧壊強度をグレード N80 の場合について示したものである。

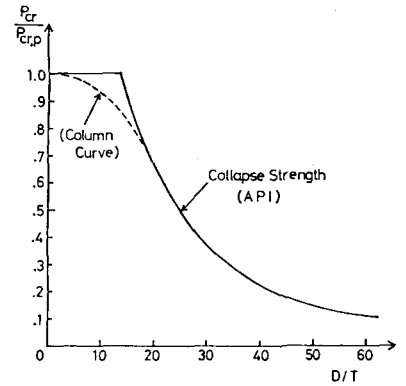


Fig. 2. Generalized Collapse Strength of Steel Pipes

Fig. 1 の縦軸に示す圧力を鋼管の塑性圧壊強度で無次元化すると、API の圧壊強度曲線は Fig. 2 に示すような曲線になる。Fig. 2 には、柱の耐荷力曲線の一般的な形状も比較のために示してあるが、これを見ると鋼管の圧壊強度曲線は Yield から Plastic に移行する部分が、柱の耐荷力曲線のようにスムーズでないことが解る。これは D/t の全範囲にあたって適正な安全率を確保する上から、今後見直す余地のある課題と思われる。

3. 2軸応力降伏条件

外圧に加えて軸引張力が作用する場合、鋼管壁内に生じている応力は2軸応力状態にある。2軸応力状態における降伏条件には種々提案されたものがあるが、これまでこの問題に最もよく用いられてきたものは最大せん断ひずみエネルギー説 (Hencky-Mises の降伏条件) である。その理由としては、実験結果と比較的よく合うことや定式化が行ない易いこと等が挙げられる。

今、鋼管が軸方向引張力と外圧を受けた場合の Hencky-Mises の降伏条件式は次のようになる。

$$\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_y}\right)^2 + \frac{\sigma_c}{\sigma_y} \frac{\sigma_a}{\sigma_y} + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_y}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

ここに、 σ_a = 軸方向引張応力、 σ_c = 周方向圧縮応力
なお、式(3)中の σ_a 、 σ_c は便宜上共に正の符号を持つものとした。

軸方向に引張力を受ける場合、周方向の降伏応力はその分だけ減じられることになり、その値は式(3)を変形した次式により得られる。

$$\sigma_{cy} = \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{T}{T_y}\right)^2} - 0.5 \left(\frac{T}{T_y}\right) \right] \sigma_y \quad (4)$$

ここに、 σ_{cy} = 引張力がある場合の周方向降伏応力
T = 引張力、 T_y = 降伏引張力 (= A σ_y)
A = 鋼管の断面積

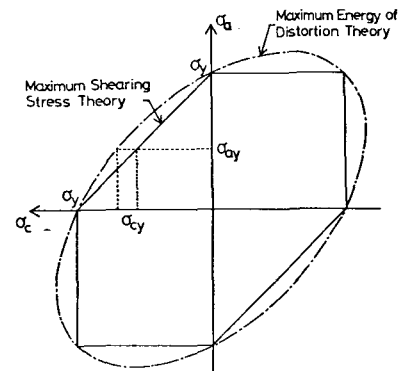


Fig. 3. Biaxial Yield Criteria

一方、定式化が容易である点から言えば、最大せん断応力説 (Tresca の降伏条件) が考えられ、これは Hencky-Mises の降伏条件に比べ一般に安全側の値を与えるので、設計に適用するには適しているということもできる。Tresca の降伏条件の場合には同様に次式が導かれる。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_y} + \frac{\sigma_a}{\sigma_y} = 1 \quad (5)$$

$$\sigma_c = \left(1 - \frac{T}{T_y}\right) \sigma_y \quad (6)$$

Fig. 3 に以上2つの降伏条件における σ_a と σ_c の関係を示す。

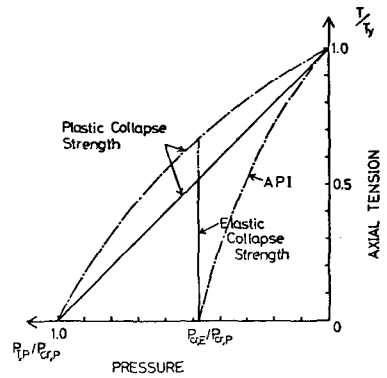


Fig. 4. Interaction Relation between Axial Tension and Pressure

4. 塑性圧壊強度における引張力の影響

塑性域における圧壊強度は式(1)で見たとおり、材料の降伏強度によって支配されるので、引張力が伴う場合はこの降伏強度が式(4)あるいは式(6)によって表わされるようになり、これらと式(1)に代入することによって引張力がある場合の塑性圧壊強度が得られる。すなわち、

Mises-Hencky 降伏条件の場合：

$$\frac{P_{T,P}}{P_{cr,P}} = \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{T}{T_y}\right)^2} - 0.5 \frac{T}{T_y} \quad (7)$$

Tresca 降伏条件の場合：

$$\frac{P_{T,P}}{P_{cr,P}} = 1 - \frac{T}{T_y} \quad (8)$$

ここに、 $P_{T,P}$ = 引張力がある場合の塑性圧壊強度

式(7)および(8)によって表わされる引張力と圧力の関係を Fig. 4 に示す。

5. 弾性圧壊強度における引張力の影響

D/t が大きくなって鋼管の圧壊現象が弾性安定条件で決ってくると、式(2)で見たとおり材料の強度は関係しなくなる。即ち、弾性圧壊が始まる時の圧力によっては鋼管壁内の応力は未だ降伏応力には達しておらず、応力的には未だ余裕のある状態にある。これを Fig. 4 の圧力-引張力の相関関係図から考察してみると、弾性圧壊強度は引張力が存在しない場合、 $P_{T,P}/P_{cr,P}$ の値が 1.0 より小さい極軸上のある点に相当することになる。これに引張力が伴ってくると、材料自体の周方向降伏応力は低下することになるが、このことは鋼管の圧壊強度には何ら影響を与えないので、Fig. 4 の圧力-引張力の相関関係図においては鉛直線と表わされることになり、この線は材料の強度の限界値である Mises-Hencky あるいは Tresca の降伏条件の限界値まで延びることになる。

Fig. 4 の中には Mises-Hencky の降伏条件をそのより弾性圧壊強度にまで拡大して適用した API の算定式の曲線も示したが、これを見ると解るように、引張力が存在する場合の API の弾性圧壊強度算定式は、理論値よりもかなり小さい値を与えている。これは多分実験的に十分な証明の出来ないまま、理論的な考察のみでは多少安全側となるように定めざるを得なかった結果であろうと推察される。

6. 実験結果との比較

以上述べてきた引張力が存在する場合の理論的な圧壊強度と、
 生友金属(株)が行なった実験結果の一部と比較してみると Fig. 5
 に示ようになる。 D/t は塑性域、塑性域と弾性域の中間および
 弾性域にあつては相対的な $D/t = 16.2, 20.4, 24.4$ の3種に変
 化させたものである。この図によると、塑性域においては Mises
 - Hencky の降伏条件の方がよく実験値と一致し、Tresca の降伏条
 件は実験結果の下限値を与えていることが解る。引張力が比較
 的小さい範囲で理論値が実験値よりも大きいのは鋼管を真円と仮
 定したためであり、鋼管の偏平度の影響は無視できないものとし
 て今後検討していく必要がある。

弾性圧壊強度は引張力によって影響を受け、現実には偏平度によ
 って理論値は下がることを考慮すれば、実験値は理論とよく合
 っていることが解る。なお、Fig. 5 は残留応力の影響を含ん
 でおらず、実験結果によればこの影響は無視できないことが解ら
 ね⁽⁴⁾、今後の検討課題であらう。

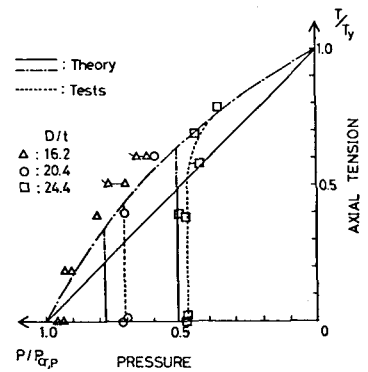


Fig. 5. Comparison of Collapse Strength between Theory and Test, $D=244.5\text{mm}$, Grade 110ksi (77kg/mm^2) (Kyogoku et. al., Ref. 4)

7. 結 語

本論文では、鋼管を真円と仮定して、軸方向引張力が存在する場合の圧壊強度を検討した。この場合には、これまでの実験結果と比較しても、理論的根拠との対応性は十分確立されたと言って良いと思われる。

鋼管が真円でない場合は、その偏平の度合いが大きく圧壊強度に影響を与え、特に大口径鋼管においてはその製造過程からある程度の偏平度は避け難く、圧壊強度と偏平度との関連性が重要になってくる。この問題について、既にいくつかの研究結果が発表されているが、今後更に検討が必要である。

さらに、こゝでは引張力と圧力の載荷手順については問題にしなかったが、これも圧壊強度に影響を与えることが実験的に確認されているので、これについても解明していく必要がある。

本論文で見てきたように、API による引張力が存在する場合の圧壊強度算定式は、その理論的根拠や実験結果からも過小な値を与えることは明らかである。今後、上に述べたような問題点をさらに詳しく検討しつゝ、速やかに改定の方角に持っていくべきであらう。

文 献

- 1) Timoshenko, S. P., and Gere, J. M., "Theory of Elastic Stability," 2nd Edition, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo,
- 2) Seely, F. B., and Smith, J. O., "Advanced Mechanics of Materials," John Wiley & Sons, New York, 2nd Edition, 1955.
- 3) "API Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties," API Bul. 5C3, 3rd Edition, American Petroleum Institute, March 1980.
- 4) Kyogoku, T., et. al., "Experimental Study of the Effect of Axial Tension Load on the Collapse Strength of Oil Well Casing," Offshore Technology Conference, Paper No. 4108, Houston, 1981.
- 5) Miller, C. D., et. al., "Tension and Collapse Tests of Fabricated Steel Cylinders," Offshore Technology Conference, Paper No. 4218, Houston, U. S. A., 1982.