

I-7 鋼管の圧壊強度に及ぼす載荷順序の影響についての一考察

北海学園大学工学部 正会員 当麻庄司
北海学園大学工学部 大滝雅靖

1. 序 言

構造用部材としては従来それ程幅広く利用されなかった鋼管ではあるが、ここ20年程の間に海洋石油の開発に伴って鋼管の利用範囲は大きく広がった。それは、波浪に対する抵抗が少ないということと内外圧に強いという鋼管の持つ特長によって、必然的にもたらされた結果であると言えることができる。一般的には、海洋構造物の部材として利用されている場合は前者の特長を重視しており、また輸送用のパイプとして利用される場合は後者の特長をより重視したものである。

海底から石油を取り出す時に用いられるTubingやcasingは、場合によっては1000m以上の深さにまで地上からぶら下げられることになり、従ってこの時には大きな自重による引張力と水圧による外圧とが作用する。海底石油の深度が大きくなるにつれてこれらの鋼管に要求される性能は厳しくなると同時に、このような荷重状態における正確な強度算定法の確立も必要になつてきた。筆者の一人は、軸方向引張力を受ける鋼管の外圧に対する圧壊強度についてこれまで検討を進めてきたが、最近¹⁾²⁾³⁾ Millerらは軸方向引張力と外圧の載荷順序も圧壊強度に影響があることを実験から確認した⁴⁾。本論文は、この鋼管の圧壊強度に対する載荷順序の影響を理論解析の上から検討しようとするものである。

2. Millerらの実験の概要⁴⁾

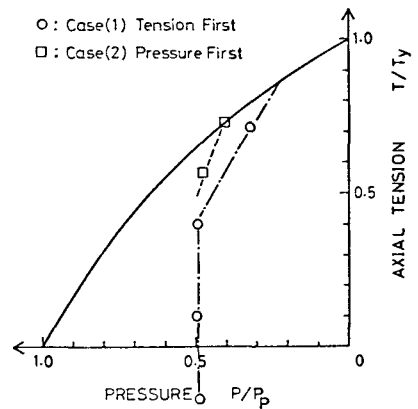
Tubingやcasingに用いられるのは継目無鋼管であるが、これについては別途実験報告があるので⁵⁾、Millerらは溶接鋼管について2年間にわたり合計42の試験体を準備して幅広い実験を行った。その中で、Millerらは軸方向引張力と圧力との載荷順序が鋼管の圧壊強度に影響があるのではないかという疑問を持ち、次のような2つの載荷ケースについて比較実験を行った。

(1) 一定の軸方向引張力を加えてから、圧力を徐々に大きくする。

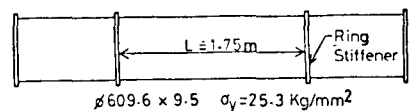
(2) まず、圧壊強度の80%まで圧力を加えてから所定の軸方向引張力を作用させ、その後さらに圧力を徐々に大きくしていく。

いずれの場合も、圧力を加えている間は軸方向引張力は一定に保たれている。

実験に用いられた材料はA36($\sigma_y=25\text{kg/mm}^2$)で、試験体の寸法は直径が $\phi 457$ と $\phi 610$ である。また、これらの径厚比は $D/t=36, 48, 64$ となってい



(a) Test Result



(b) Specimen

Fig.1 Test Result of Collapse Strength for Fabricated Tube (Group 3, by Miller et al.)

る。

Fig.1 にこれらの代表的な実験の結果の例を示すが、これを見ると載荷ケース(2)の方が載荷ケース(1)よりも若干圧壊強度が高くなっていることが解かる。これは破壊の状況からリングスティフナーや溶接の影響ではないことが確かめられており、またFig.1に見られる傾向は他の寸法の試験体にも同様に見られることから、Millerらはこの違いは載荷順序の影響からくると判断した。

3. 軸方向引張力を伴う場合の圧壊強度

次に、軸方向引張力と外圧とを同時に受ける場合の鋼管の外圧に対する強度算定式についてその概略をまとめる。実際の鋼管は製作上の問題から当然ある程度の偏平度を有しているので、外圧が作用した場合には鋼管の壁内には円周方向に軸圧縮力Nと同時に曲げモーメントMも生じる。偏平度の形状を左右上下の2軸対称形と仮定すれば、最大曲げモーメントは円形断面の4分点に生じ、この点の応力状態が全断面降伏になった時にメカニズム状態となり、この時の圧力を圧壊強度と定義される。

Fig.2 に断面力M,Nの生じている状態を示す。また、Fig.3 には単位長さを考えて、最大の応力が全断面降伏状態になった時の曲げモーメントによる応力と円周方向圧縮力による応力との関係を示すが、今断面は矩形であるのでこの時全断面降伏の条件は次式によって与えられることになる。

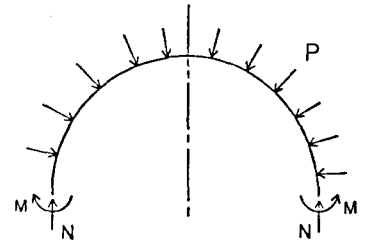


Fig.2 Circumferential Sectional Forces

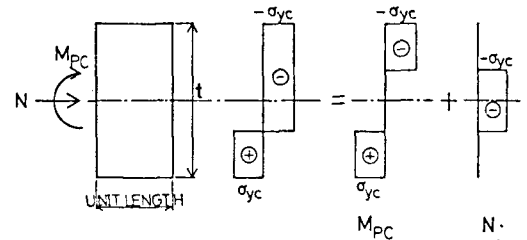


Fig. 3 Full Plastic State of Rectangular Cross-Section

$$\left(\frac{N}{N_{pc}}\right)^2 + \frac{M}{M_{pc}} = 1 \quad (1)$$

ここに、 N_{pc} =曲げモーメントが存在しない場合の円周方向全塑性軸力($=\sigma_{yc} \cdot t$), M_{pc} =軸力が存在しない場合の全塑性モーメント($=\sigma_{yc} \cdot t/4 = P_{pc} \cdot D \cdot t/8$), σ_{yc} =軸方向引張力が存在する場合の円周方向の降伏強度, t =鋼管の板厚, D =鋼管の直径

式(1)を圧力Pの関係で置き換えると

$$\left(\frac{P}{P_{pc}}\right)^2 + \frac{M}{M_{pc}} = 1 \quad (2)$$

となる。ここに、 P_{pc} =全塑性圧壊強度($=2\sigma_{yc}/(D/t)$)であり、また曲げモーメントMは弾性理論によれば次のように圧力の項で表される⁶⁾。

$$M = \frac{P D^2}{4} \frac{W}{1 - P/P_E} \quad (3)$$

ここに、 P_E =弾性圧壊強度($=2E/[1-(1-\nu^2)](D/t)^3$)、 W =偏平度($=(D_{max}-D_{min})/(2D)$)

円周方向の降伏強度は、軸方向に引張力が存在する場合 2 軸応力状態となり、Hencky-Misesの降伏条件を用いると次式のようなになる。

$$\frac{\sigma_{yc}}{\sigma_y} = \sqrt{1 - 0.75\left(\frac{T}{T_y}\right)^2} - 0.5\frac{T}{T_y} \tag{4}$$

ここに、 σ_y ＝一軸降伏強度、 T ＝軸方向引張力、 T_y ＝降伏軸方向引張力
 (＝ $A\sigma_y$)、 A ＝鋼管の断面積

式(2)において第 2 項のモーメント部分を圧力に置き換えると、軸方向引張力と圧壊強度との関係が求められ次のようになる。

$$\left(\frac{P}{P_{PC}}\right)^2 + \frac{P}{P_{PC}} \frac{2WD/t}{1 - P/P_E} = 1 \tag{5}$$

そしてこの関係式は一般的に圧壊強度における軸方向引張力の影響の傾向を実験値と比較してよく表しているということが報告されている³⁾。

4． 載荷順序の影響に対する解析的考察

荷重ケース(1)の場合と荷重ケース(2)の場合の基本的な違いは、圧力の増加を受ける時に円周方向の降伏強度が軸方向引張力の影響を受けているかどうかにあると思われる。もし曲げモーメントが式(3)で計算されるとすれば、弾性圧壊強度 P で曲げモーメントの圧力による増幅部分が支配されているため、この円周方向の降伏強度の違いによって圧壊強度は変わらないことになる。しかし、実験結果では明らかに軸方向引張力の存在によって曲げモーメントが大きくなっていると思われる。

軸方向引張力を伴う場合の圧壊強度を与える条件式である式(2)をプロットすると Fig.4 に示すようになり、これを見ると解かるように軸方向引張力が存在することによって全塑性になる限界が同心円的に小さくなってくる。今この図の上に、例えば $T/T_y = 0.6$ の軸方向引張力を加えてから圧力を徐々に大きくしていった時の軌跡をプロットしてみると Fig.5 の Case(1)の線のようになる(荷重ケース(1))。荷重ケース(2)の場合は荷重ケース(1)の場合よりも圧壊強度が大きいのであるから、この時の軌跡は Fig.5 の Case(2)の線で示すように荷重ケース(1)よりも上にくることになる。いずれの場合も、式(2)で示される限界線よりも外に出ることはない。

Fig.5 によると、今ある圧力 P を与えて 2 つの荷重ケースにおける曲げモーメントの大

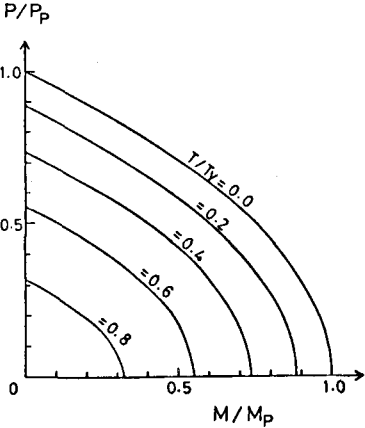


Fig.4 Interaction Curve between Circumferential Axial Force and Bending Moment

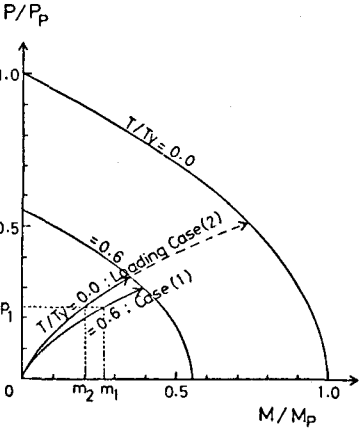


Fig. 5 Loading Paths

きさを考えてみると荷重ケース(1)の方が大きくなければならないことが解かる。然るに式(3)から解かるように、圧力Pが同じであれば荷重ケースに関係なく曲げモーメントが一定となり、これとは矛盾することになる。そこで式(3)を次の式で置き換えて考えてみることにする。

$$M = \frac{P D^2}{4} \frac{W}{1 - P / P_{cr}} \quad (6)$$

ここに、 $P_{cr} = P_E$ か P_{pc} のいずれか小さい方
式(6)を用いるとすれば、軸方向引張力を伴う場合の圧壊強度算定式である式(5)は次のようになる。

$$\left(\frac{P}{P_{pc}} \right)^2 + \frac{P}{P_{pc}} \frac{2WD/t}{1 - P / P_{cr}} = 1 \quad (7)$$

式(7)において、 P_{cr} が弾性圧壊強度 P_E で支配されている範囲においては荷重ケース(1)も荷重ケース(2)も同一の軌跡を示すことになるが、軸方向引張力が大きくなって全塑性圧壊強度 P_{pc} で支配される範囲の場合には軸方向引張力が大きくなるにつれて全塑性圧壊強度は小さくなり、従って圧壊強度は小さくなって先の実験結果の傾向と一致することになる。

Fig.6 に2つの荷重ケースについて、式(7)を用いて計算した一例を示す。ここで用いたデータとしては、 $D/t = 35$, $W = 0.01$, $\sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$, $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ および $\nu = 0.3$ である。軸方向引張力 $T/T_y = 0.0, 0.2$ および 0.4 に対しては式(7)において $P_{cr} = P_E$ となり、いずれも同じ線上の軌跡を示しているが、 $T/T_y = 0.6$ と 0.8 については $P_{cr} = P_{pc}$ となり軌跡の線は下にきている。すなわち、軸方向引張力が大きくなる程圧壊強度は小さくなる。

式(5)は弾性理論に基づいており、弾性圧壊強度が全塑性圧壊強度よりも大きい場合は明らかに圧壊強度は危険側の値を与えることになる。実際の鋼管断面は管壁の最縁部(表面)が降伏を始めると、Fig.7 に示すように曲げモーメントと変形の関係は線形でなくなる。この図において曲率が非常に大きくなったときに与えられる全塑性モーメント M_{pc} は Fig.3 でみたように軸方向圧縮力の存在によって小さくなっていくことがよく表わされている。Fig.7 に示すような、モーメント・曲

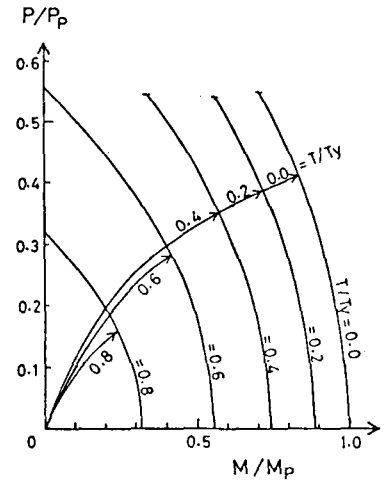


Fig.6 Sample Calculation for Comparing the Loading Cases

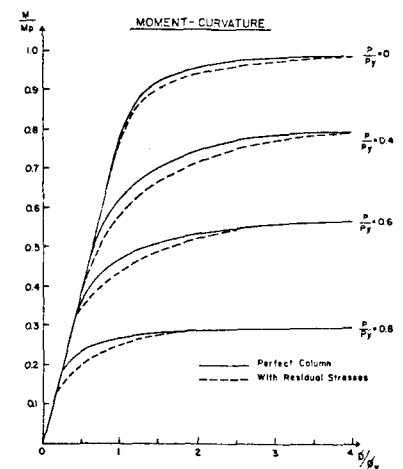


Fig. 7 Moment-Curvature Relations

率関係の弾塑性解析的なアプローチを圧壊強度式に取り入れるとすれば非常に複雑な算定式となり、これまで検討してきたような圧壊強度算定式の簡便さが失われてしまうことになる。この簡便さを失わない範囲で考えるとすれば、式(7)は設計算定式として式(5)よりも危険側の値を与えないことと载荷順序の影響を説明できるという点からより適していると考えられる。

軸方向引張力を伴う場合の圧壊強度の算定式である式(5)と式(7)について次に比較検討してみる。Fig.8 は両式によって求めた圧壊強度をプロットしたものである。この図を見ると偏平度Wが大きくなるに従って圧壊強度は小さくなっていくことが解かる。また、軸方向引張力が小さい範囲では圧壊強度への影響は小さく、軸方向引張力が大きくなるにつれて圧壊強度はHencky-Misesの降伏条件の境界線に漸近していく。Fig.8 において、実線は式(5)を用い、また点線は式(7)を用いた場合を表す。この計算例では鋼管の径厚比 $D/t=24.4$ および降伏強度 $\sigma_y=7320\text{kg/cm}^2$ としているが、この場合は $T/T_y > 0.6$ で $P_E > P_{PC}$ となり、従ってこの範囲では圧壊強度は点線の方が若干小さくなる。そして偏平度Wが大きくなる程両者の差は小さくなっている。また、 $T/T_y < 0.6$ の範囲では軸方向引張力と圧力の载荷順序の影響は出てこないということになる。

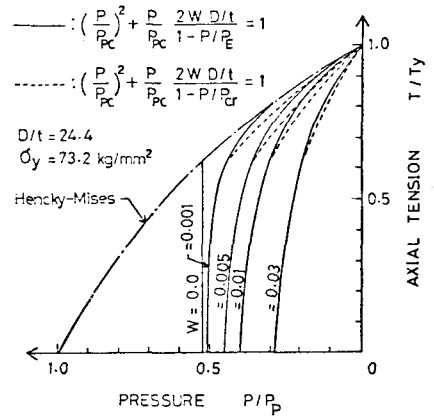


Fig.8 Effect of Loading Sequence on the Collapse Strength of Steel Tube

5. 結 語

Millerらが行った実験はリングスティフナーが取り付けられており、その場合の弾性圧壊強度や全塑性圧壊強度はここで述べた算定式によって求めることはできない。従って、以上の検討はこれまで報告されている実験結果と直接比較することはできず、単に傾向を調べるための解析的考察にすぎないのではあるが、今後これをさらに進めていくためにはこの载荷順序の影響を調べるための幅広い実験が必要である。しかし、この種の実験は非常に大がかりな装置を必要とするためなかなか実施しにくい面があり、その点から言ってある程度今回のような解析的検討の積重ねをまず行っていく必要があるのではなうかと思われる。そうした後に実験を実施すれば、的の絞った効率の良いものとなり有意義な結果が得られることになる。

また、継目無鋼管に対する圧壊強度の実験データはかなり得られているので、式(7)を用いた場合の実験値との比較を行う必要がある。

参考文献

- 1) 当麻庄司：引張力を受ける鋼管の圧壊強度について，土木学会北海道支部論文報告集，第40号，1984.2.

- 2) 当麻庄司：鋼管の圧壊強度に及ぼす軸方向引張力の影響について，第7回海洋工学シンポジウム，日本造船学会，1984.6.
- 3) 当麻庄司：鋼管の圧壊強度における解析値と実験値の比較，土木学会，第39回年次学術講演会講演概要集，1984.10.
- 4) Miller,C.D.,et al., "Tension and Collapse Test of Fabricated Steel Cylinders," OTC4208, Offshore Technology Conference, Houston, May 1982.
- 5) Kyogoku,T.,et al., " Experimental Study of the Effect of Axial Tension Load on the Collapse Strength of Oil Well Casing," OCT4108, Offshore Technology Conference, Houston, May 1981.
- 6) Timoshenko,S.P..and Gere,J.M., "Theory of Elastic Stability," 2nd Edition, McGraw-Hill Kogakusha Ltd, Tokyo.