

小口径管の軸圧縮座屈モードに関する研究

小林弘典^{*1}・山浦寿幸^{*2}・小畑清和^{*2}・上野 修^{*3}

Buckling Mode Study of Small Diameter Pipes under the Uniform Axial Compression

Hironori Kobayashi^{*1}, Hisayuki Yamaura^{*2},
Kiyokazu Kobatake^{*2}, and Osamu Ueno^{*3}

It is well known that Euler's elastic buckling occurs when long bars are compressed in the axial direction. However, the plastic buckling or compressive failure will be occurred as the length of the bars is shortened excessively in contrast with the cross-sectional size. The objectives of this study are to obtain the load of the axial compressed buckling for safety designs and to get the buckling modes. The test specimens are cut out from the commercial thin wall steel pipes, and both ends of the pipes are ground squarely. The parameters of the tests are the outside diameters, the wall thickness, the axial length and the materials of *JIS STPG 370* (mild steel) and *JIS SUS 304* (stainless steel). The buckling loads and buckling modes are discussed in comparison with the *FEM* analysis.

1 緒言

長柱に軸圧縮荷重を負荷すると、オイラー座屈を生じることが知られている。しかし、軸方向長さが相対的に短くなると、種々のモードの座屈や、圧縮破壊を生じようになるが、未解明の点も多い。^{1)~5)} 本研究は、地震時の圧縮荷重による配管及び円筒支持装置の座屈防止に役立つことを目的として、円筒の圧縮座屈モードと座屈荷重について、研究するものである。市販の薄肉鋼管から切断・加工して試験体を作製し、円筒の半径、肉厚及び軸方向長さをパラメータとした軸方向圧縮試験を行い、発生する座屈モー

ドを観察し、汎用構造強度解析プログラムNASTRANでの解析計算と比較した。

2 試験方法

2.1 試験体

試験体の材質としては、圧力配管用炭素鋼鋼管STPG370と一般配管用ステンレス鋼鋼管SUS304MPD（以下、SUS304とする）の二種類の鋼管を使用した。試験体の加工手順は、まず鋼管を計画寸法に切断し、その両端面を旋盤で軸方向に対して鉛直に機械加工した後に、その両端面

水産大学校研究業績 第1572号, 1997年6月20日受付.

Contribution from National Fisheries University, No.1572, Received Jun. 20, 1997.

*1 水産大学校研究科 (Graduate School, National Fisheries University).

*2 水産大学校海洋機械工学科海洋機器工学講座 (Laboratory of Ocean Engineering Machineries, Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University).

*3 練習船耕洋丸 (Training Ship Koyo-Maru, National Fisheries University).

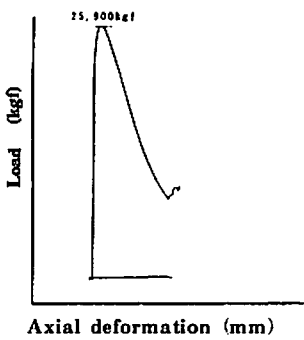
を平面研削盤で仕上げた。

また形状は、上記の両端面研削仕上げしたものと、座屈発生応力に対する偏平の影響を調査するために、これをさらに半径方向に圧縮して偏平にしたものを作製した。

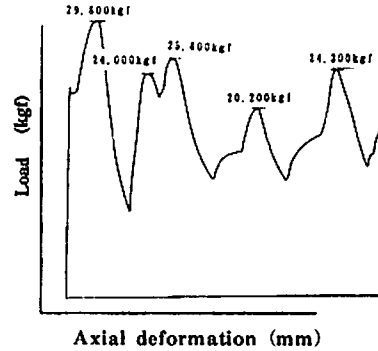
2.2 軸圧縮荷重の負荷方法

室温で、試験体に軸圧縮荷重を万能試験機で負荷し、座屈が開始するときの荷重を測定した。万能試験機の圧縮試験関連の仕様は次の通りである。

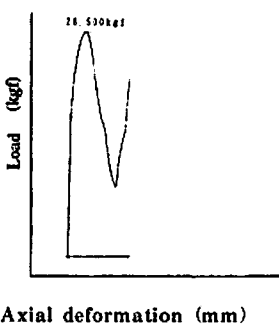
最大圧縮荷重	30,000kgf
下部クロスヘッド昇降速度	450mm/min
下部クロスヘッド・テーブル間最大距離	300mm
圧盤の大きさ(径, 上下部用共)	100mm



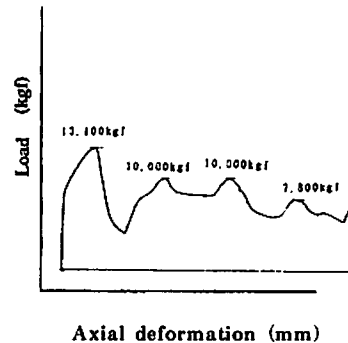
(a) Primary axisymmetric buckling(STPG370)



(b) 4th axisymmetric buckling(STPG370)



(c) Primary non-axisymmetric buckling(SUS304)



(d) 4th non-axisymmetric buckling(SUS304)

3 試験結果

3.1 軸圧縮荷重と軸方向変形量の関係

図1に軸圧縮荷重と変形の関係を示す。これは、すべての試験体が軸方向座屈を軸荷重のピークごとに繰り返すことを示している。

STPG370, SUS304ともに座屈発生荷重の第1次波ピーク荷重が、その後生じる第2次波, 第3次波, 第4次波のピーク荷重よりも大きいことから、この第1次波ピーク荷重を座屈発生荷重とした。表1に試験で得られた座屈発生荷重のデータを示す。

Fig. 1. Relationship between the axial compressive load and the axial deformation

Table 1. Shape species and buckling load

Material	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Height (mm)	Buckling Load (kgf)
STPG370	48.68	3.55	38.60	26,300
STPG370	48.68	3.54	37.70	26,500
STPG370	48.69	3.55	71.85	26,400
STPG370	48.69	3.55	70.60	26,600
STPG370	48.60	3.70	106.45	24,600
STPG370	48.60	3.70	106.65	24,900
STPG370	48.60	3.70	149.30	24,300
STPG370	48.60	3.70	144.30	24,200
STPG370	48.68	3.58	174.50	27,000
STPG370	48.69	3.57	175.30	27,000
STPG370	60.42	3.29	38.40	29,200
STPG370	60.43	3.32	39.20	29,300
STPG370	60.42	3.27	64.25	30,800
STPG370	60.42	3.33	63.80	31,200
STPG370	60.50	3.20	106.75	30,100
STPG370	60.50	3.20	106.35	30,200
STPG370	60.50	3.20	106.60	30,100
STPG370	60.50	3.20	143.80	29,700
STPG370	60.50	3.20	148.10	29,800
STPG370	60.67	3.09	174.55	21,800
STPG370	60.60	3.09	173.80	22,600
SUS304	48.73	2.03	37.75	16,600
SUS304	48.70	2.03	37.60	12,600
SUS304	48.74	2.03	70.55	13,900
SUS304	48.70	2.03	71.70	13,700
SUS304	48.60	2.00	109.00	12,600
SUS304	48.60	2.00	106.30	13,200
SUS304	48.60	2.00	106.50	13,200
SUS304	48.60	2.00	106.60	13,600
SUS304	48.60	2.00	146.30	12,700
SUS304	48.60	2.00	147.50	13,100
SUS304	48.66	2.03	176.00	13,600
SUS304	48.76	2.03	173.15	12,700
SUS304	48.45	2.84	37.85	24,700
SUS304	48.74	2.76	38.05	24,400
SUS304	48.74	2.85	73.35	23,800
SUS304	48.74	2.81	73.40	27,700
SUS304	48.60	3.00	105.25	21,800
SUS304	48.60	3.00	105.40	23,400
SUS304	48.60	3.00	105.20	25,700
SUS304	48.60	3.00	108.50	21,900
SUS304	48.60	3.00	142.00	24,100
SUS304	48.60	3.00	150.10	23,100
SUS304	48.76	2.80	174.25	23,800
SUS304	48.78	2.84	175.70	23,900
SUS304	60.42	3.29	38.40	29,200
SUS304	60.43	3.32	39.20	29,300
SUS304	60.42	3.27	64.25	30,800
SUS304	60.42	3.33	63.80	31,200
SUS304	60.50	3.00	101.20	25,800
SUS304	60.50	3.00	98.50	23,900
SUS304	60.50	3.00	106.70	26,000
SUS304	60.50	3.00	104.30	25,300
SUS304	60.50	3.00	152.00	23,800
SUS304	60.50	3.00	140.60	25,200
SUS304	60.32	2.89	173.60	29,400
SUS304	30.34	2.82	174.50	25,200

3.2 座屈発生モードについて

座屈発生後の試験体外観の写真をSTPG370, SUS304についてそれぞれ図2および図3に示す。材質ごとの座屈発生モードの特徴は次の通りであった。

(1)STPG370の場合の座屈発生モード

座屈の発生順序は、まず試験体の上端または下端付近から軸対称座屈を発生し、次に順次に座屈を発生して、全長に渡って座屈を繰り返す。波の外径、波の谷径、1波ごとのピッチは、第1次波から第5次波までほぼ均一になっている。ただし、いくつかの試験体では、図2(f)のように第1次波は軸対称座屈で第2次波以降が楕円形の非軸対称座屈を生じることもあった。

(2)SUS304の場合の座屈発生モード

座屈モードはすべて非軸対称座屈であって、上端または下端付近から楕円形の第1次波を生じた。第2次波は座標軸がそれと90°方向に楕円形の非軸対称座屈を生じ、第3次波は第1次波と同方向に生じ、以下交互に非軸対称座屈を発生した。

3.3 座屈発生応力と軸方向波数との関係

図4(a), (b)は、座屈発生応力と、長さ l と外半径 a の比 l/a との関係を示す。この図では、軸方向に第1次波から第5次波の座屈を生じたものを記入している。座屈発生応力は同一材料、同一形状に対して、ほぼ同じ値を示すことがわかる。図4(c)は、図4(a)と図4(b)を重ね合わせたものであるが、これより軸方向座屈の波数は、第1次波の座屈を生じたときの軸方向長さの約2倍、3倍、4倍、5倍でそれぞれ2個、3個、4個、5個の座屈波を発生することが分かる。

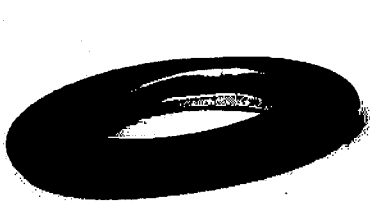
4 解析

汎用構造強度解析プログラムNASTRANで座屈解析を1/2円筒モデルについて行った⁷⁾。

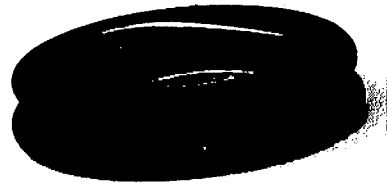
4.1 要素分割

STPG370とSUS304の試験体各1個について、軸方向に20分割、また半周を15分割して、300メッシュの要素分割モデルを作製した。

図5に要素分割図を示す。



(a) Primary axial buckling



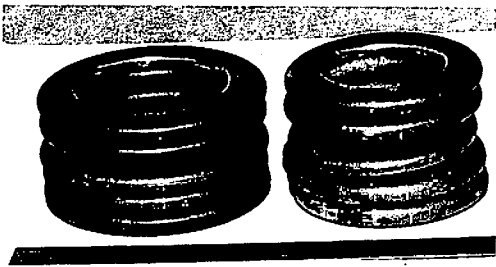
(b) Secondary axial buckling



(c) Tertiary axial buckling



(d) Fourth axial buckling

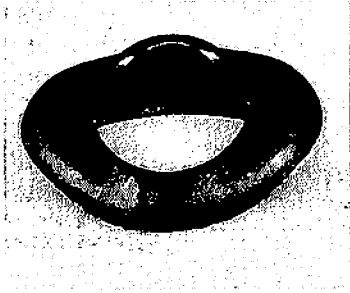


(e) Fifth axial buckling

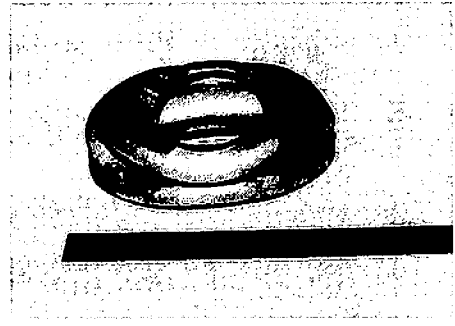


(f) Mixed modes of axisymmetric and non-axisymmetric buckling

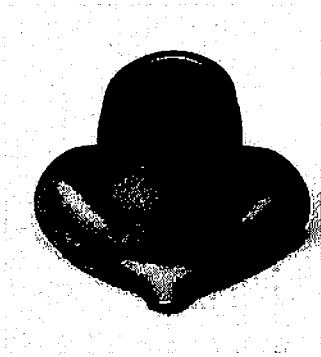
Fig. 2. Relationship of buckling modes (STPG370)



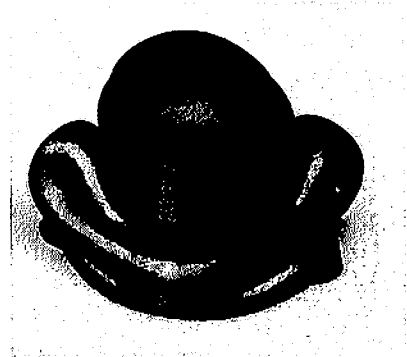
(a) Primary axial buckling



(b) Secondary axial buckling



(c) Tertiary axial buckling

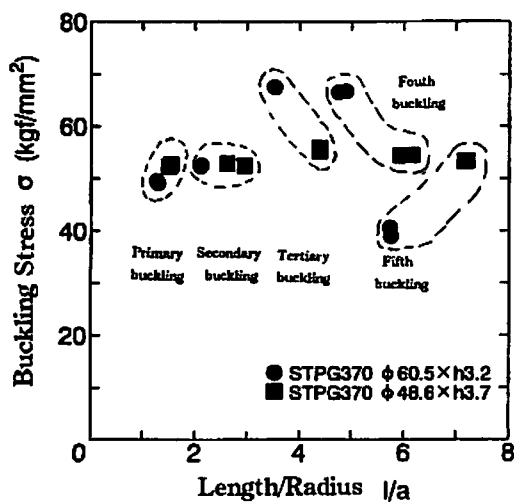


(d) Fourth axial buckling

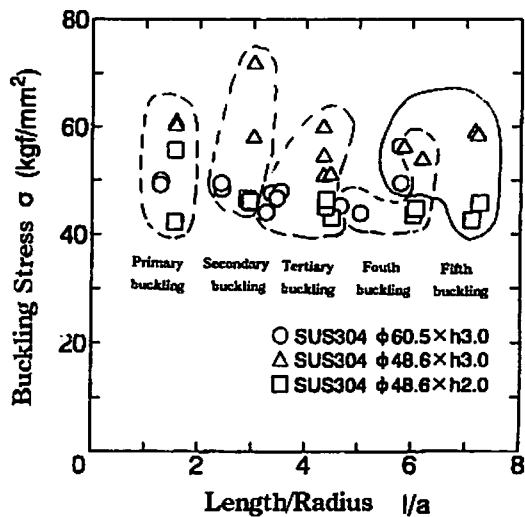


(e) Fifth axial buckling

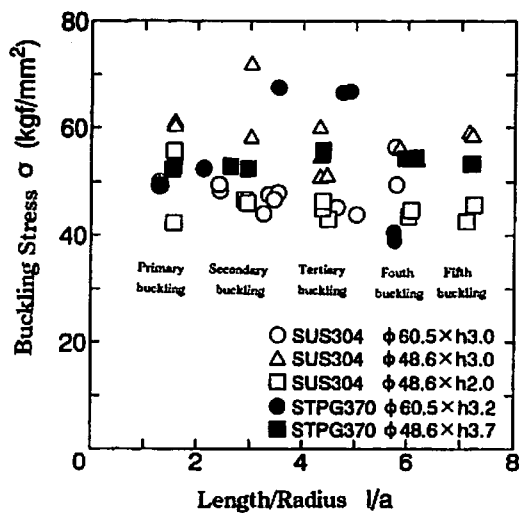
Fig. 3. Relationship of buckling modes (SUS304)



(a) STPG370



(b) SUS304



(c) STPG370 and SUS304

Fig. 4. Relationship between buckling stress and length/radius

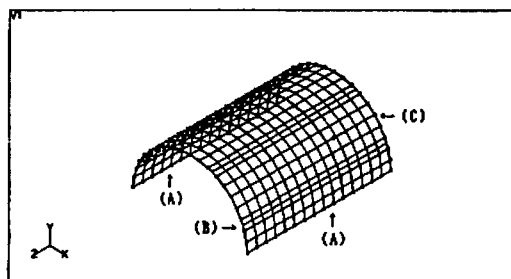


Fig. 5. Divide of elements

4.2 端部拘束条件

半円筒の端部拘束条件を次のとおりとした。

(A)面：Y方向拘束，X，Z方向自由

(B)端面：Z方向拘束，X，Y方向自由

(C)端面：X，Y，Z方向自由

4.3 解析結果

(1)変形について

NASTRANによる変形図を図6に示す。

STPG370の場合、軸方向に山谷を交互に繰り返した変形となっていることは、試験の波形と類似しているが、周方向に一様な山谷（軸対称）とはなっていない。

SUS304の場合は、楕円形の第1次波に対して、90°方向に非軸対称の第2次波を生じることを示しており、試験時の楕円形の非軸対称座屈と類似している。

しかし、STPG370、SUS304いずれの変形解析の場合にも、第1次波と第2次波が同時に進行しているのに対して、座屈試験では、第1次波の座屈が発生してから第2次波の座屈が発生し、その次に第3次波の座屈が発生しており、第2次波以降が第1次波と同時に進行することはなかった。

(2)座屈発生荷重について

STPG370

$l=143.80$, $d=60.50$, $h=3.20$ のとき

解析での座屈発生荷重 721,893kgf

SUS304

$l=106.70$, $d=60.50$, $h=3.00$ のとき

解析での座屈発生荷重 573,335kgf

STPG370、SUS304の両方の場合とも、汎用構造強度解

析プログラムNASTRANでの解析値の荷重の方が非常に大きくなった。

5 考察

5.1 座屈発生応力と弾塑性圧縮応力との関係

長柱の場合、各種の実験公式が提案されていて⁶⁾、その代表的なものは図7のとおりである。図中、 k =断面二次半径 $=\sqrt{I_z/A}$ 。ただし、 I_z =断面二次モーメント、 A =断面積である。また、 l は軸方向長さである。図7に準じて、円筒の座屈発生応力を、長さ/断面二次半径(l/k)で整理して平均直線を求めると、次のようになった。

STPG370, $d60.5 \times h3.2$ の場合

$$\sigma = 52.607 + 0.156^{1/k}$$

STPG370, $d48.6 \times h3.7$ の場合

$$\sigma = 56.771 - 0.097^{1/k}$$

SUS304, $d60.5 \times h3.0$ の場合

$$\sigma = 47.661 + 0.104^{1/k}$$

SUS304, $d48.6 \times h3.0$ の場合

$$\sigma = 62.158 - 0.658^{1/k}$$

SUS304, $d48.6 \times h2.0$ の場合

$$\sigma = 49.199 - 0.557^{1/k}$$

となり、図8を得る。これより、座屈応力は図7の各実験式の右下りの線よりも、水平となり座屈発生応力が、試験範囲の l/k に対してほぼ一定となる。

5.2 軸対称座屈と非軸対称座屈のモードについて

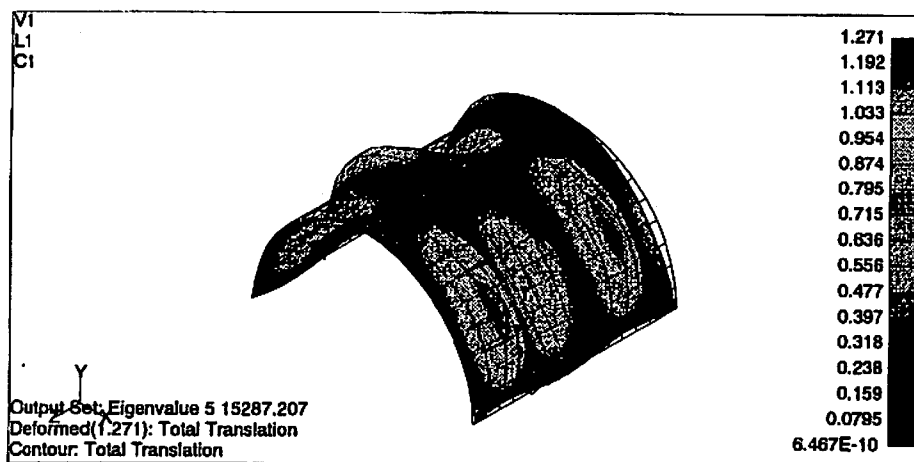
本研究では、STPG370とSUS304の双方とも座屈発生応力が降伏応力をはるかに越えていることから、塑性座屈が発生したと考えられる。しかし、座屈モードとしてはSTPG370は軸対称座屈、SUS304は非軸対称座屈である。このように、別々の座屈モードが発生したことについては、解析の変形図でも同じ傾向が認められている。今後、原因の解明を解析との対比を含めて行いたいと考える。

なお、図2(f)に示すように少数例であるが、STPG370において一つの試験体で軸対称座屈と非軸対称座屈の双方が発生することがあった。しかし、この場合の座屈発生荷重とその他の一般的な軸対称座屈が発生する荷重との差異は認められなかった。

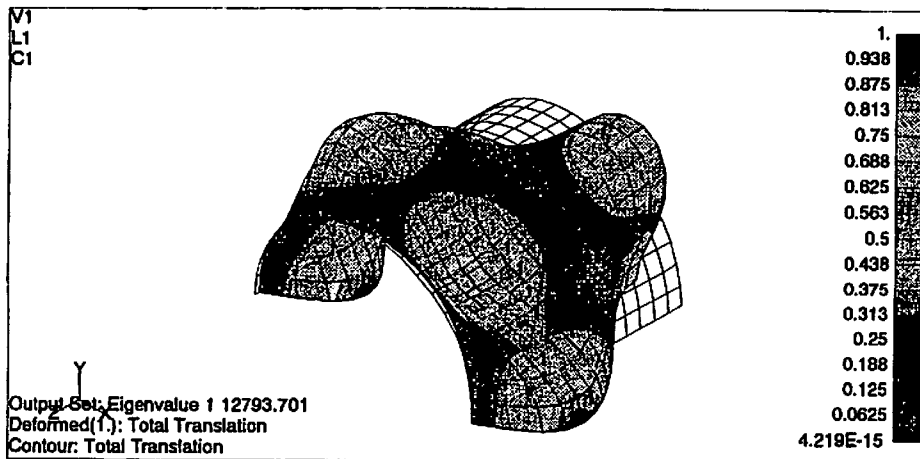
5.3 偏平率の影響について

SUS304の場合に楕円形に座屈となる現象は、偏平率が影響したためと考えた。そこで、試験体に予め8~14%の偏平率を与えておいて、軸圧縮荷重を荷したところ、試験体はいずれも非軸対称座屈を生じた。また、試験体はいずれも非軸対称座屈を生じた。また、平均直線

$\sigma = 47.741 + 0.139l/k$ を求めた。この結果より、見かけ上の真円と偏平加工した場合とでは、座屈発生応力にほとんど差がないことが図9より分かった。よって、SUS304の場合、試験体加工時の工具締め付けによる微小な偏平化が原因とは考えられない。



(a) STPG370



(b) SUS304

Fig. 6. Deformations by NASTRAN analyses

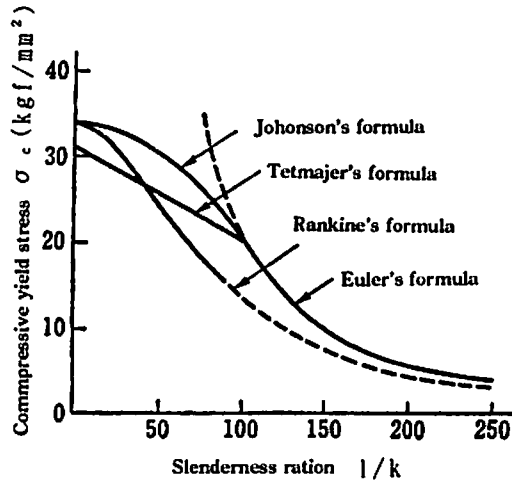
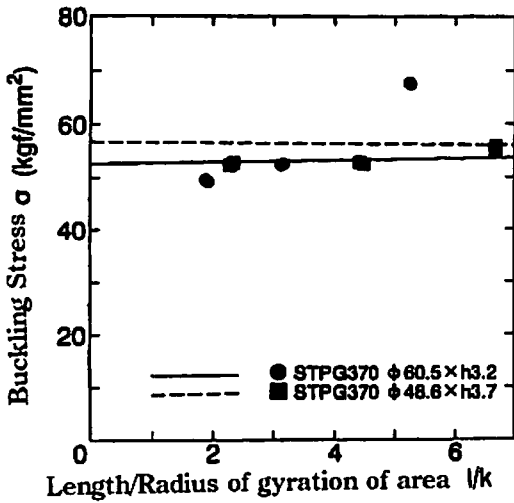
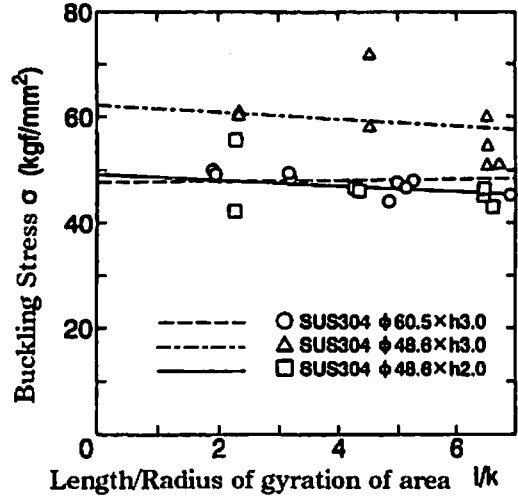


Fig. 7. Inelastic buckling formula⁶⁾



(a) STPG370



(b) SUS304

Fig. 8. Relationship between buckling stress of cylinder and length/radius of gyration of area

5.4 試験とNASTRANでの解析値の比較

著者らの座屈解析は、その緒についたばかりであり、解析結果は試験に合致するに至らなかった。特に、座屈発生荷重は前述の通り、大幅なひらきがあった。座屈変形もSTPG370の場合、試験の軸対称モードと完全には一致していないので、今後更に、解析手法の検討を進めたい。

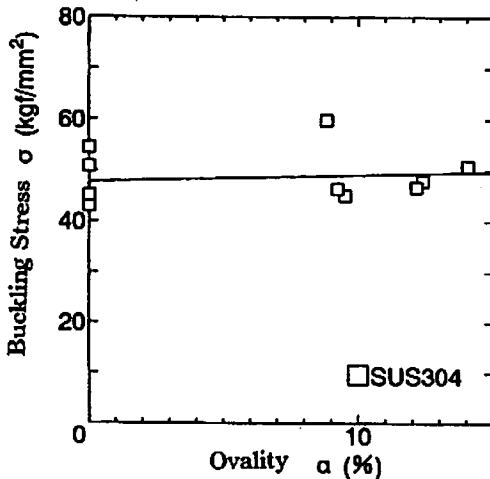


Fig. 9. Relationship between buckling stress and ovality

6 結 言

小口径管の軸圧縮による座屈発生荷重と、座屈モードを解析した。この結果は、配管強度設計、特に配管耐震強度設計に役立つと考える。

本研究の結果、次の結論を得た。

(1)STPG370およびSUS304の小口径薄肉の短管に軸圧縮荷重を負荷し、軸方向に1～5次波の座屈を発生させた。

1次波のみを生じる短管の場合の最大の座屈発生荷重と、2～5次波まで生じる管の座屈荷重は、ほぼ同じであった。

(2)2, 3, 4, 5次波の座屈は、1次波の場合の試験体長さのそれぞれ2, 3, 4, 5倍の長さの試験体で発生した。

(3)SUS304の非軸対称座屈モードの場合、第1次波目と第2次波目以降が座標軸方向に90°ずつずれた楕円形状の重ね合わせとなった。

(4)偏平率を与えた試験体と与えていない試験体のどちらも座屈発生応力は、ほぼ同じ値を示した。

謝 辞

本研究の試験実施においては、水産大学校海洋機械工学科助手の小林克登氏ならびに、同学科学生の小野泰文君に多大なご協力をいただいた。記して深甚の謝意を表する。

文 献

- 1) 小野泰文, 小林弘典, 小畑清和, 山浦寿幸: 日本機械学会中国四国学生会 第27回学生員卒論研究発表講演会(1997).
- 2) 小畑清和・山浦寿幸: 水産大研報44(3), 117-129(1996).
- 3) 三木栄治・川上哲也・小畑清和・山浦寿幸: 日本機械学会中国四国学生会 第25回学生員卒論研究発表講演会(1995).
- 4) K.Kobatake, S.Takahashi, T.Osaki, T.Simakawa, and O.Baba: Fatigue Life Prediction of Bellow Joint, PVP-51,91-104(1981).
- 5) 川井忠彦・藤谷義信: 座屈問題解析, 初版, 培風館, 東京(1991).
- 6) 清家政一郎: 材料力学, 第30版, 共立出版, 東京, (1993), P161.
- 7) MSC/NASTRAN for windows.