

繰返し軸方向力を受ける部材の挙動に関する一実験

若林 実・野中泰二郎・小城 修・山本 昇

AN EXPERIMENT ON THE BEHAVIOR OF A STEEL BAR UNDER REPEATED AXIAL LOADING

By *Minoru WAKABAYASHI, Taijiro NONAKA, Osamu KOSHIRO*
and *Noboru YAMAMOTO*

Synopsis

The structural behavior of a braced frame greatly depends on the restoring-force characteristics of the bracings themselves. A bracing is primarily subjected to the axial force, tensile and/or compressive. This paper presents the results of an experimental study on the behavior of steel bars under alternate cyclic axial loading. In the first series of tests, bars are monotonously compressed, the main attention being paid on their post-buckling strength. In the next series, bars are subjected to a number of cycles of compression and tension with gradual increase of the axial displacement amplitude. The axial load-displacement relations are recorded by an "Autograph" testing machine.

1. 序

軸方向力だけを受ける材、及び軸方向力の卓越した部材の非弾性域における性状に関する従来の研究は、柱の弾塑性挙動や不静定トラスの終局耐力に関して、或いはトラス梁等に対するリミットアナリシスの適用性に関連してなされてきた^{1)~4)}。例えばトラス梁やトラスで構成されたフレームにおいては、単調に増大してゆく外力に対して引張及び圧縮材がそれぞれの耐力限界に達する場合に、引張材の挙動は材料の応力-ひずみ関係と同様なものとなるが圧縮材では不安定現象とその後の挙動が複雑な様相を示す。従ってこの場合には軸方向圧縮力を受ける材に関して圧縮限界軸力近辺での性状、さらにそれ以後の軸力減少状態における性状を究明する必要がある。

次に筋違を有するラーメンが地震力などの繰返し水平力を受けるとき、弾塑性域でどのような剛性、変形性状、減衰性を有するかを知るには筋違の繰返し軸方向力を受ける場合の挙動を把握することが重要である。即ち繰返し軸方向力を受ける部材が座屈現象なども含めて、圧縮及び引張力による交互の弾塑性変形を通じて、どのような履歴現象を示すかを明らかにする必要がある。

このような部材の挙動は軸方向力と軸方向変位量、並びにたわみ量との関係をもって表現される。ここでは細長比を変化させてそれらの関係を求めることを目的として、単調載荷実験と繰返し載荷実験を行ない、その結果に対して考察を加えた。

2. 実 験

2.1 実験計画

軸方向圧縮力の処女加力時の最大荷重に対する挙動は細長比、材料の性質等によって異なる。また座屈以後の軸方向力と軸方向変位の関係が部材の長さによってどのように変化するかを知る必要がある。それに関連してたわみ量を知ることは部材の弾塑性性状を解明する上で重要である。さらに圧縮及び引張力の繰返し加力に際し、塑性ひずみ履歴による部材の挙動の変化を追跡することができれば、繰返し水平力を受ける骨

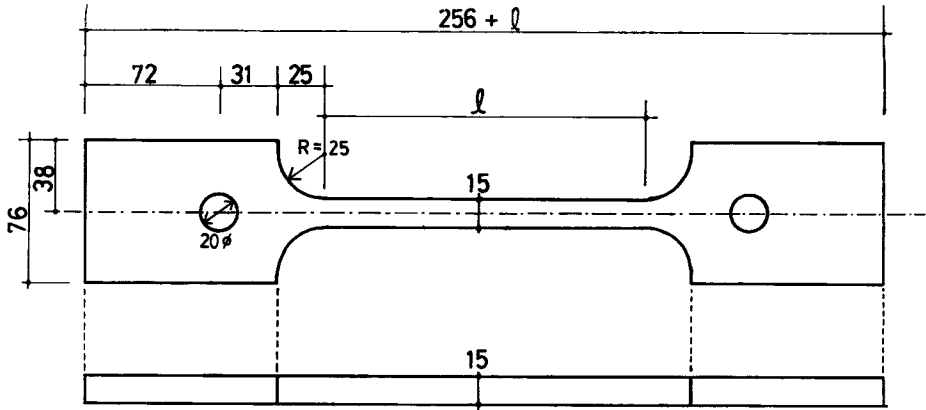


Fig. 1 Test specimen.

組での筋違の弾塑性性状を明らかにすることができる。

以上の理由から、材端の条件を一方回転自由、それに直角の方向に完全固定として、その条件を満足するように、供試体の形状と関連づけて材端装置を設計した。供試体の断面は一定で、細長比を変化させる。そして最初に単調圧縮加力実験を行ない、続いて繰返し加力実験を行なった。繰返し加力の方法は、圧縮力と引張力の交番加力とし、その制御は漸増変位振幅で行なった。

2.2 供試体及び材料の性質

Fig. 1 に供試体の寸法形状を示す。供試体は厚さ 20 mm の SS41、圧延鋼板より切出してして製作した。断面は一辺 15 mm の正方形断面とし、Fig. 1 での l を変化させて細尾比を変える。細長比は単調載荷のもので 140, 120, 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40 の 9 種とし、Steel Rectangular Monotonous の頭文字を取って SR14M, SR12M...SR4M と呼ぶことにする。繰返し載荷のものには細長比 120, 100, 以下 10 刻みに 40 まで 8 種、Cyclic の頭文字より、SR12C, SR10C...SR4C と呼ぶ。

供試体の実測寸法、及び、それから求めた断面性能その他を Table 1 に示す。

次に材料の性質に関しては、引張試験結果の応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。

降伏応力度 2330 kg/cm²、最大引張強度 4199 kg/cm²、ひずみ硬化初期のひずみ 0.8%、最大伸び率 32.05% であった。

2.3 材端装置

Fig. 3 に概略を図示する。この装置は圧縮及び引張力を加力装置から供試体に伝えるとともに供試体の材端条件を規定する。材端条件は一平面内で回転自由、それに直角な平面内で完全固定である。装置は外側フレーム a と内側フレーム b とから成り、外側フレームは加力装置に固定され、内側フレームは高力ボルトで供試体端部を固定して A-A 軸のまわりに回転出来る様になっている。回転は外側フレームに固定された回転中心軸に対し、スラスト及びラジアルベアリングを介して行なわれる。中心合わせは内側フレームと回転中心軸の相対位置を微動ダイヤル c で移動することにより行なわれる。この装置の製作に際しては回転中心軸が、外側及び内側フレームに対して充分な精度を持って通るよう配慮されている。

このような装置が両材端にそれぞれ用いられた。従って供試体の座屈長さは回転中心間距離をもって表わ

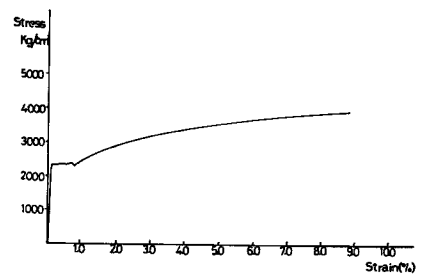


Fig. 2 Stress-strain diagram.

Table 1 Dimensions of test specimens.

Specimen name	Width (mm)	Depth (mm)	Length of Specimen (mm)	Slenderness ratio	Elastic Buckling Load (t)	Yield Load (t)	Experimental Ultimate Load (t)	Loading Condition
S R 14M	15.23	14.96	607.0	140.38	2.395		2.390	Monotonous
S R 12M	15.27	14.98	520.5	120.37	3.270		3.326	
S R 10M	15.27	14.98	434.5	100.49	4.692		4.100	
S R 9M	15.23	14.87	391.5	91.19		5.278	4.305	
S R 8M	15.37	14.89	347.5	80.85		5.333	4.820	
S R 7M	15.01	14.94	305.0	70.73		5.226	4.880	
S R 6M	15.04	14.88	259.5	60.41		5.215	5.200	
S R 5M	15.26	14.94	217.5	50.43		5.312	5.200	
S R 4M	15.18	15.02	174.0	40.13		5.312	5.205	
S R 12C	15.42	14.96	521.0	120.66	3.283		4.00	Cyclic
S R 10C	15.16	14.98	434.0	100.37	4.671		4.50	
S R 9C	15.04	14.96	392.0	90.78		5.243	5.90	
S R 8C	15.21	15.07	349.0	80.23		5.340	5.80	
S R 7C	15.03	15.12	305.0	69.87		5.296	5.90	
S R 6C	15.23	14.93	260.5	60.44		5.298	5.55	
S R 5C	15.06	15.00	218.0	50.35		5.264	5.40	
S R 4C	15.45	14.90	174.0	40.46		5.364	5.90	

される (Fig. 1 参照)。両端回転自由の材端条件であるからこの座屈長さは材長 l に相当する。この装置の回転に対する拘束がほとんどなかったことが単調載荷実験結果とオイラー荷重との比較で確かめられた。

2.4 加力装置

(a) 単調載荷実験：加力用試験機としては、細長比 140~80 のものには防災研究所アムスラー型長柱試験機が、70~40 までは同 100t 万能試験機が用いられた。

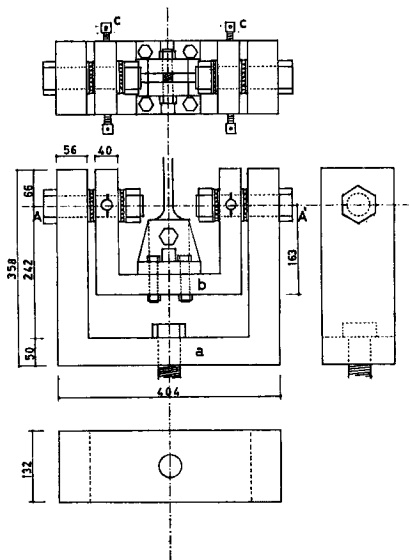


Fig. 3 End-support.

(b) 繰返し载荷実験：工学部建築学教室島津オートグラフ試験機（最大ヒョウ量 10t）が引張圧縮両振試験機として用いられた。

2.5 加力方法

(a) 単調载荷実験：加力装置は油圧式であるから荷重の調整は手動によってなされる。各荷重段階で荷重を一定に保持して、それぞれの測定を同時に、しかも速やかに行なう。最大荷重に達する前の加力は各荷重段階を区切って測定を行ない、最大荷重に達した後は一時一定に保つか減少する。一方変形が増大してゆくから荷重の制御は軸方向変位量に基づいて送油量を調整して行なう。

(b) 繰返し载荷実験：加力装置はモーターによるクロスヘッド駆動方式である。試験速度は付属の自動負荷制御装置を用いて負荷速度設定範囲内で無段階に速度を設定することが可能である。本実験では定速負荷速度設定方式を採用する。これは軸方向変位量を差動トランスで測定し、それを自動負荷制御装置への入力として、変位速度と設定速度を自動的に一致させるようにする方法である。計画した、圧縮及び引張の最大変位量に達したときに加力方向（軸方向圧縮、または引張）を逆転させ最大繰返し数に達するまで実験を継続する。もちろん途中で载荷を止めないことを原則とするがワイヤーストレインゲージ（以下 W.S.G. と略す）によるひずみ測定のとくのみ一時止める。尚軸方向の力・変位関係は差動トランスで測った変位とロードセルによる荷重を X-Y レコーダー上に記録させる。

2.6 変形測定方法

(a) 単調载荷：軸方向変位は Fig. 4 の測定装置において差動トランスに換えてダイヤルゲージを取り付けて行なう。この測定装置は供試体の回転中心、即ち座屈長さの両端に打ったポンチ穴に装置を固定するようになっている。尚軸方向変位量は 2 個のダイヤルゲージの読みの平均を取る。中央たわみ量はダイヤルゲージによって求め、試験機の载荷機枠の変形によって加わる変位成分もこれをダイヤルゲージで測って修正可能とする。ひずみの測定は座屈長の部分の両端（回転中心）より内側 1 cm の位置、及び中央において、正方形断面の各辺の中心で軸方向に、塑性ひずみ測定用 W.S.G. を貼付して行なう。さらに材端ゲージと中央ゲージの間に 3~2 点、等間隔で座屈方向の両面に塑性ひずみ測定用ゲージを貼付する。

(b) 繰返し载荷：Fig. 4 の測定装置によって、2 個の差動トランスで平均を取って軸方向変位とし、前節で述べた方法で軸方向力との関係を得る。中央たわみ量はダイヤルゲージにより、载荷を継続したまま瞬間的に読み取って、同時に X-Y レコーダーにマークを入れ、荷重と対応させる。

ひずみの測定はやはり W.S.G. で行ない、貼付位置は (a) と同じであるが測定回数は少くし、各 cycle、最大変位点、及び荷重ゼロの点、などで行ない平均 1 cycle 当り 4 回とする。そしてその時のみ载荷を止める。

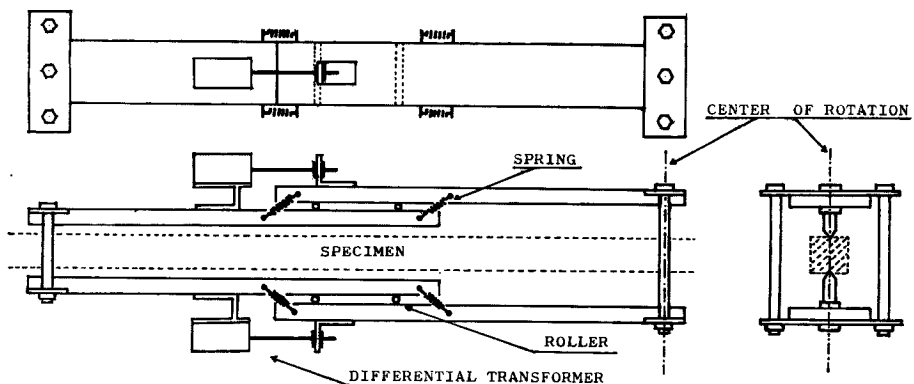


Fig. 4 Deformation measurement.

2.7 実験経過及び結果

(a) 単調載荷実験：最初に加力試験機に両端の材端装置を取り付ける。供試体をセットした後、予め 150 kg の圧縮軸力を加え、その荷重において、変形測定装置の原点とする。各測定装置の取り付け、及び原点調整を行なう。次に予想される最大荷重の 3 割程度の軸力を加えて中心合わせを行なって後、測定を開始する。最大荷重に近づくにつれ測定回数を増し、載荷速度を遅くして座屈直前の挙動を精確に求める。

SR14M, SR12M, SR10M では材軸が直線を持続したまま弾性的に縮み、オイラー荷重に達すると急激に座屈し、油圧調整バルブを絞っても安定する状態に達するまでは測定不可能であった。SR9M~SR4M の試験体では、材が真直ぐでしかも最大荷重を保ったまま軸方向変位だけが增加する状態があって後座屈する。座屈時の急激な荷重低下後、安定した状態から測定を再開した。Photo. 1 に実験後の状態を示す。

W.S.G. によるひずみに関しては、長い材 (SR14M ~SR10M) では座屈以前は、全て弾性域、座屈後は中央部が曲げによって塑性域になっている。一方、短い材 (SR9M~SR4M) ではすべて、はらみ出し以前に片方の材端部から軸方向塑性ひずみが増大してゆき、他の部分では降伏ひずみの直前でとどまっている状態が見られた。座屈後は端部の塑性ひずみは残留し、中央部の曲げによる塑性ひずみが顕著であった。軸方向変

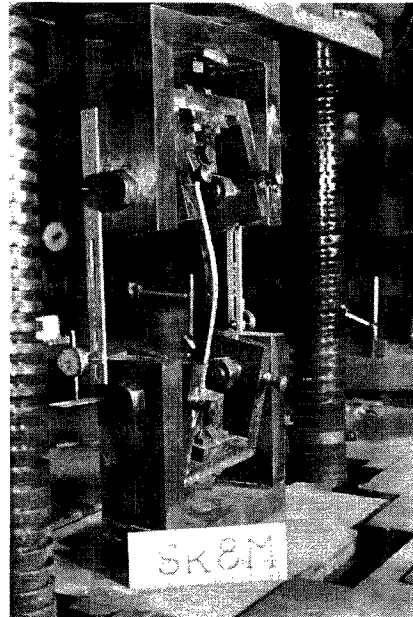


Photo. 1 Test apparatus and specimen for momotonous loading.

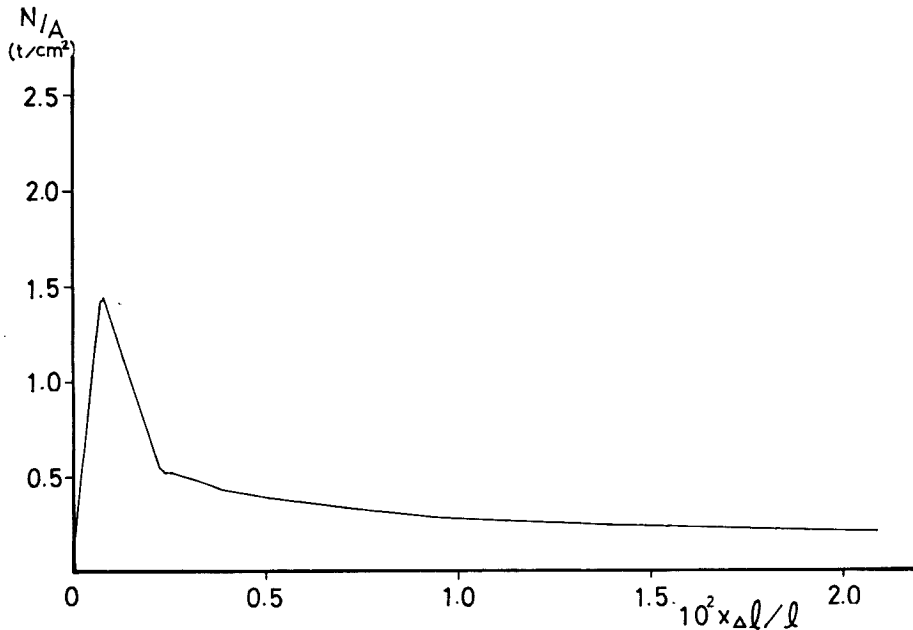


Fig. 5 Axial force-displacement relation for SR12M.

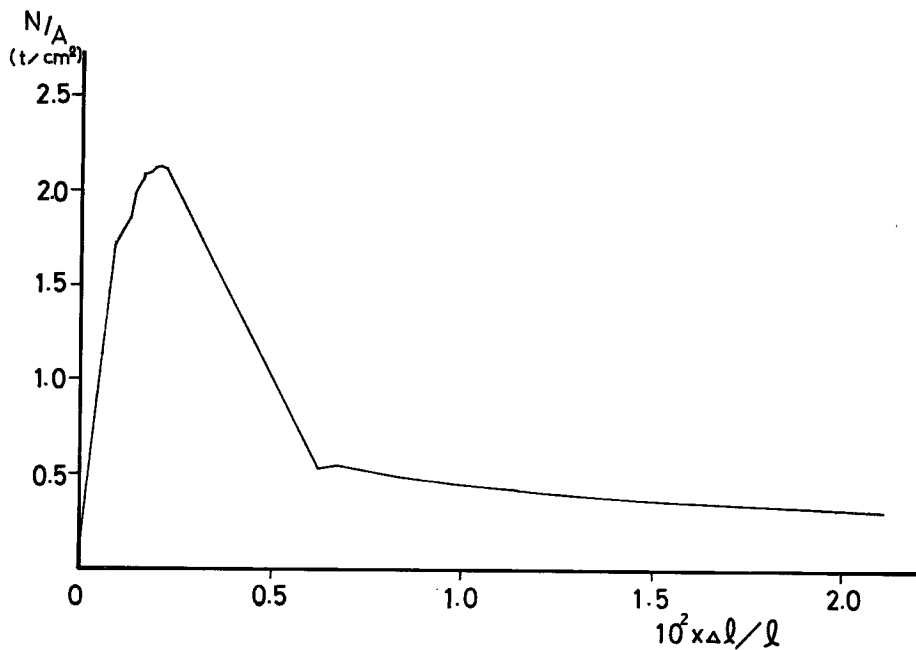


Fig. 6 Axial force-displacement relation for SR8M.

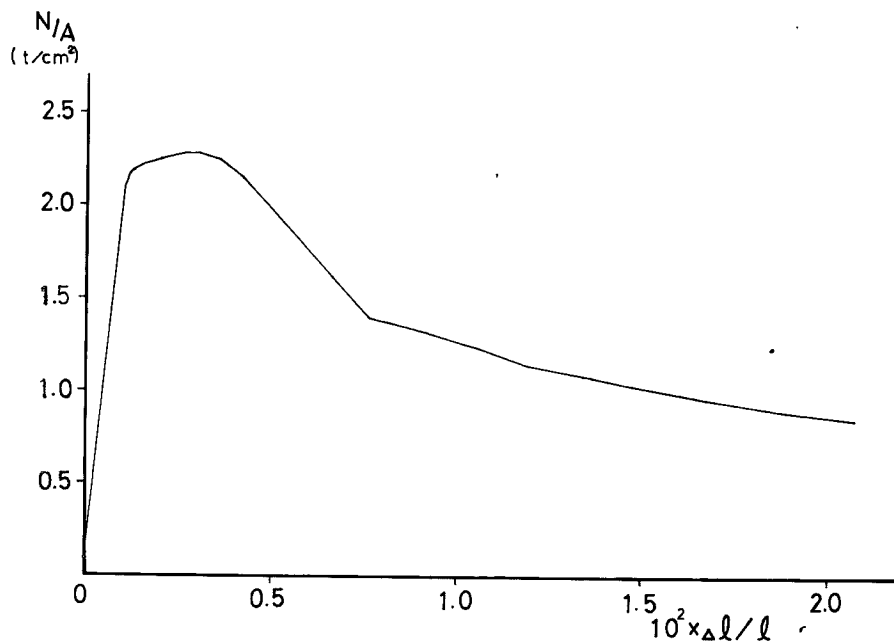


Fig. 7 Axial force-displacement relation for SR4M.

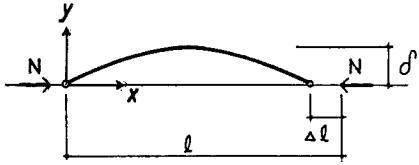


Fig. 8 Notation.

位が元の材長の約2%になるところで実験を終了した。測定開始から座屈まで1~2時間、終了まで2時間半~3時間を要した。その結果としての軸方向力-軸方向変位の関係を、SR12M, SR8M, SR4M について Figs. 5~7 に示す。尚記号については Fig. 8 に図示した。A は供試体の断面積である。

(b) 繰り返し載荷実験：加力試験装置に材端装置を取り付け、さらに供試体を、取り付け用高力ボルトで強力に締め付けてセットする。次に各測定装置の取り付け、原点調整を行なう（この場合は予めの加力を行わず、荷重計の原点を確かめながら以上の操作を行なう）。中心合わせは(a)の場合と同様に行なってから自動負荷制御装置の試験速度を設定して載荷を開始する。途

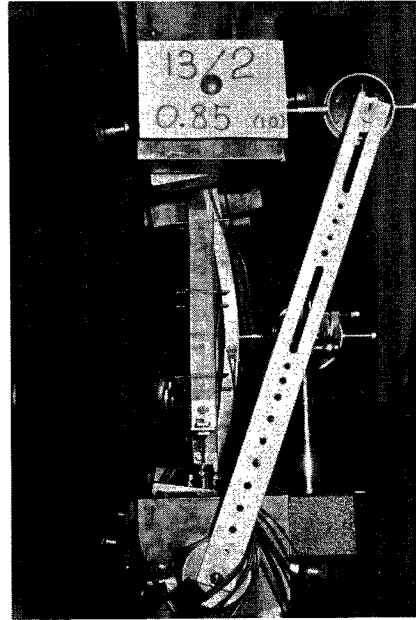


Photo. 2 Test apparatus for repeated loading.

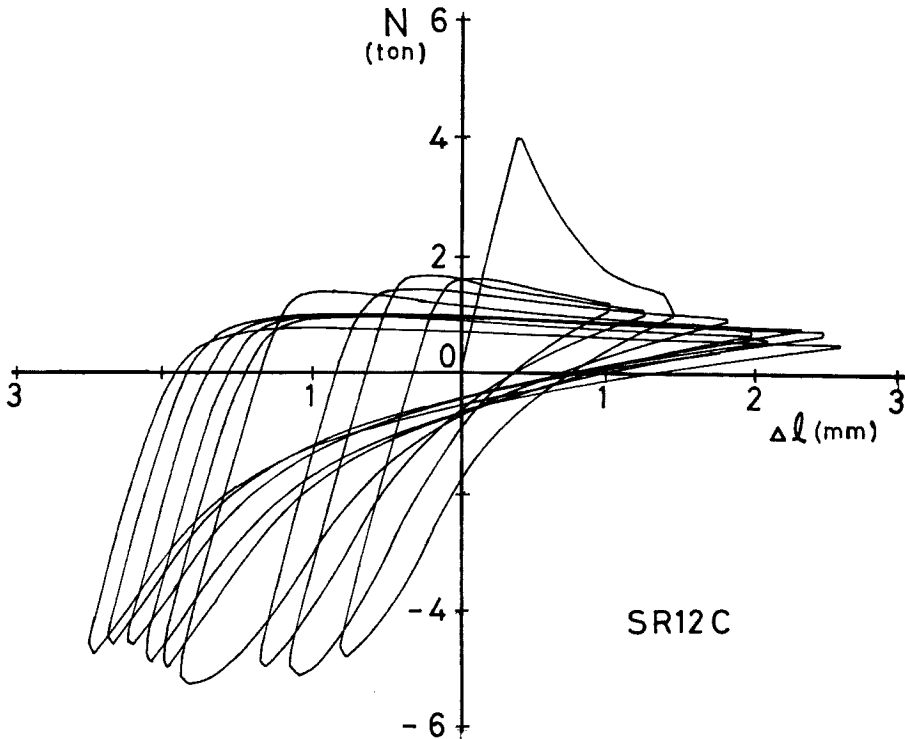


Fig. 9 Test result for SR12C.

中、中央たわみ測定を適当な変位段階で行なった。荷重ゼロ、及び最大振幅に到達したときに荷重を一時止めて W. S. G. によるひずみ測定、及び写真撮影を行なった。その時の写真の 1 例を Photo. 2 に示す。

負荷速度は単調荷重実験より速く 1 cycle 平均 15~20 分である。これは加力装置の可能な速度範囲によって制限を受けることにもよるが、荷重装置の適正速度が試験体の剛性によって決定される為、この種の座屈実験のように剛性が極端に変化する場合には、選択し得る負荷速度は非常に制限されることによる。さらに変位速度を一定に保持する役割の自動負荷制御装置においても、処女荷重時の、荷重と変位の急激な変化に際して変位振幅の制御が順調に行なわれなかった。このことは、Figs. 9~11 に観られるように 1/2 cycle の圧縮側最大変位量が、設定したものを超過する結果となった。しかし以後の繰返し回では順調に作動し、設定した変位振幅で交互に軸力が反転し一定の変位速度が保たれた。

中央たわみの測定決果を Fig. 12~Fig. 14 に示す。ただし Figs. 5~14 で N 及び Δl の符号は圧縮の方向に正としている。

W.S.G. によるひずみ測定に関しては、SR12C, SR10C, では、処女荷重の座屈前は弾性ひずみの範囲にあり、座屈後は中央部の曲げによる塑性ひずみが繰返し状態に応じた値の変化を示し、端部では終始弾性ひずみであった。SR9C~SR4C では、処女荷重において、SR9C が一端から、SR5C, SR6C が両端から塑性ひずみが増大してゆき、座屈に到った。その他の材は中央から塑性ひずみが増大して座屈することが見られた。以後の繰返し回でのひずみの状態は残留ひずみの量、及び軸方向への分布状態が材長の相異により、或いは処女荷重時のひずみ履歴の相異によって複雑な様相を示した。

尚、実験における繰返し回数は 20 cycle 前後まで続けたが、図に示す回数以後についても、大体、同形のループを描いている。

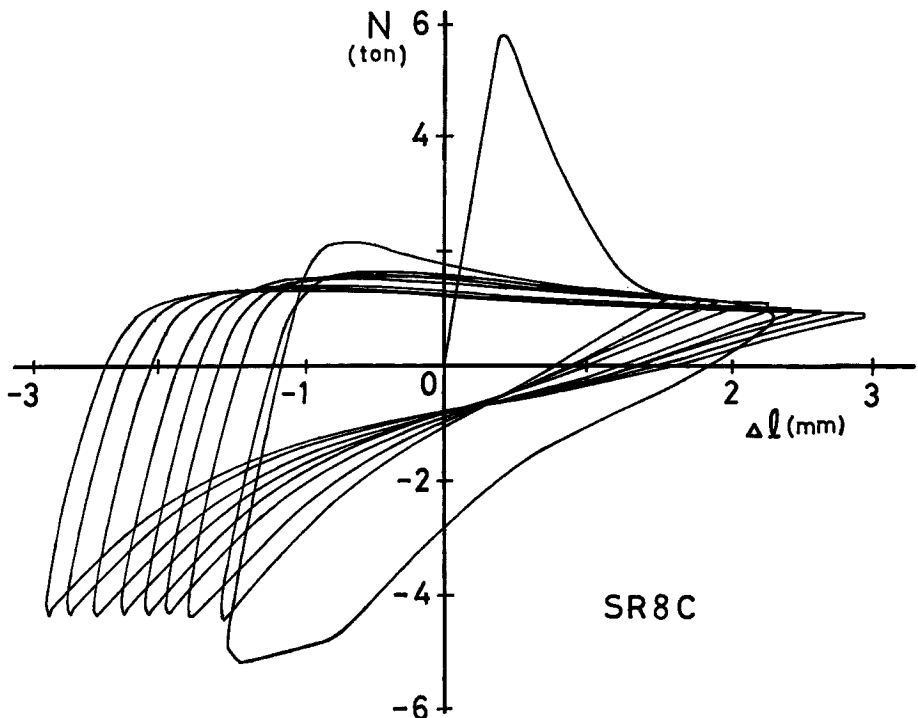


Fig. 10 Test result for SR8C.

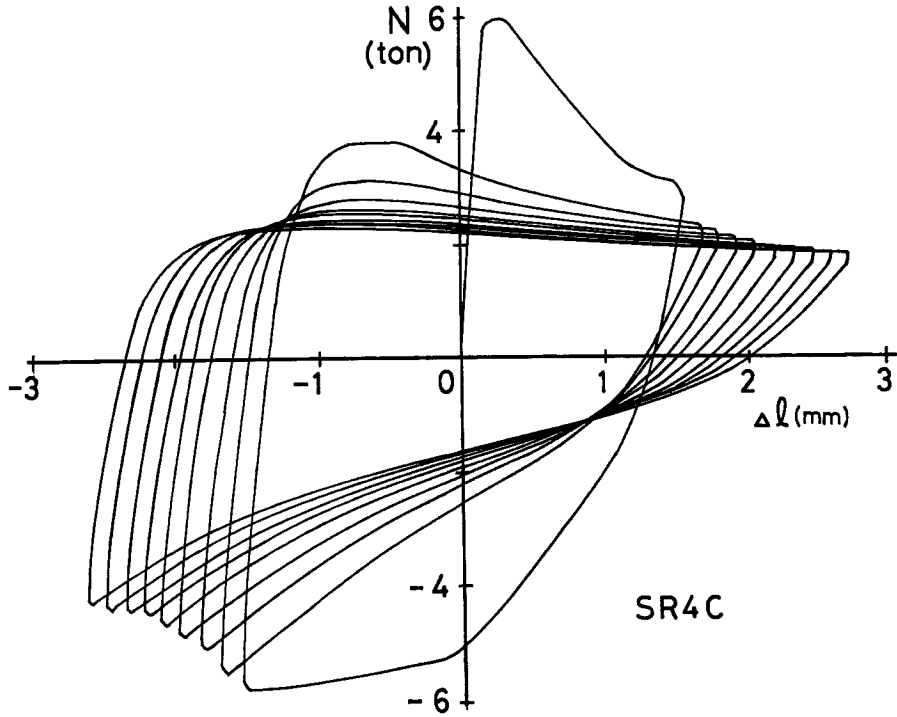


Fig. 11 Test result for SR4C.

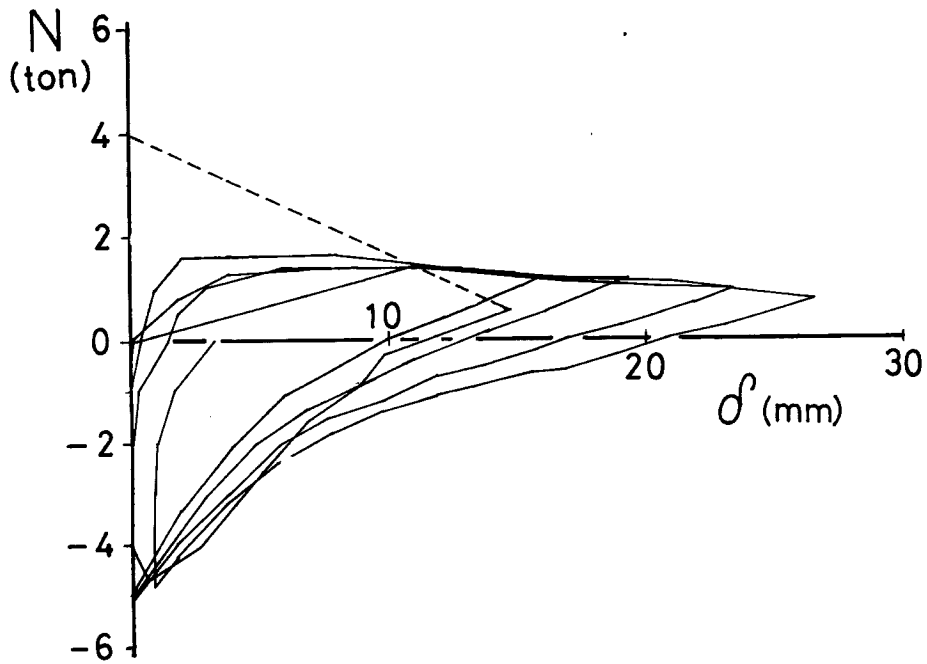


Fig. 12 Load-deflection relation for SR12C.

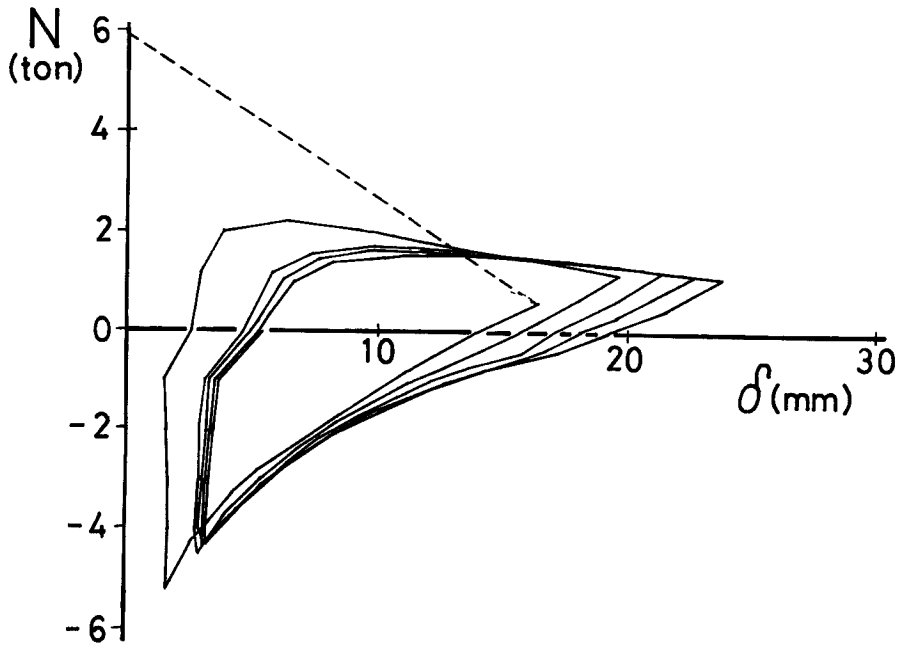


Fig. 13 Load-deflection relation for SR8C.

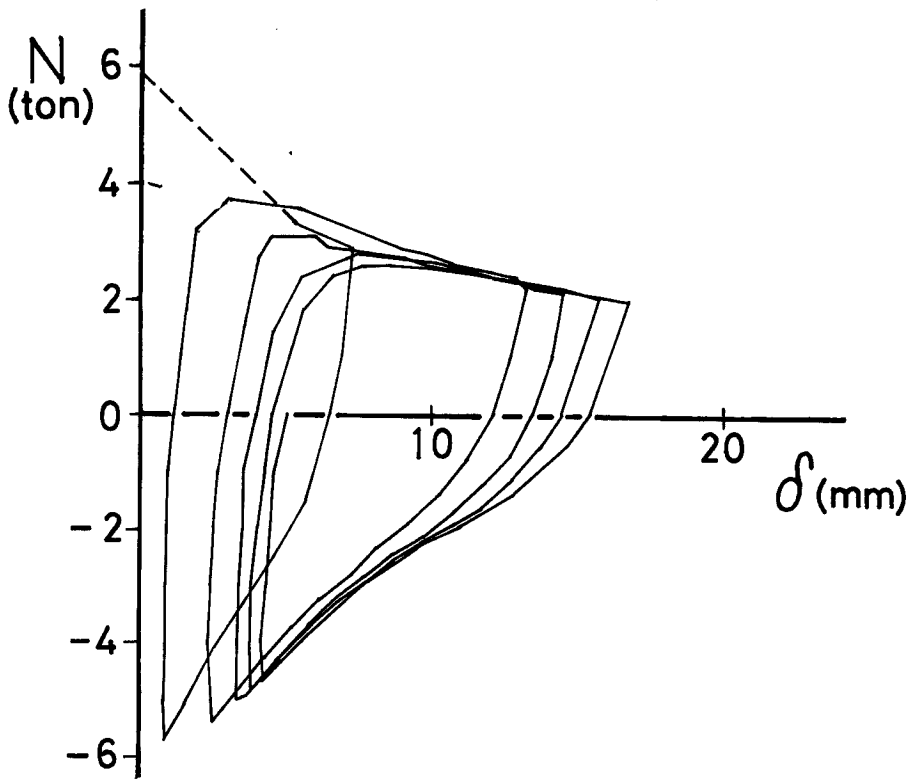


Fig. 14 Load-deflection relation for SR4C.

3. 実験結果についての考察

以下に於ては図示した試験体についてのみ述べるが、それ以外のものに関しては、細長比に応じてその中間的な考察がなされ得る。

(a) 単調載荷：最大耐力に対して、座屈後の軸方向抵抗力を比較すると、SR12M では 0.5% の変位において最大荷重の約 30%、2% 変位で約 15% が存在する。SR8M では 0.7% 変位において最大荷重の約 25%、2% 変位で約 15% の軸方向耐力が残っている。SR12M よりも SR 8M の方が座屈後の軸力低下率が大きいのは、SR8M が限界細長比に近い為である。SR4M では 1.2% の軸方向変位においてもなお最大軸力の 50% もの軸方向抵抗力が残っており、2% 変位で 40% の軸力を受け持つことが可能である。

(b) 繰返し載荷：初期座屈荷重を Table 1 に示したが、ほとんどの供試体について、オイラー荷重或いは降伏荷重よりも高い値を示している。これには載荷速度の影響が考えられるが現段階では明確な理由はない。 $N-\Delta l$ 関係 (Figs. 9~11) については 3/2 cycle 以後は大体同傾向の性状を示している。SR4C, SR8C, SR12C, いずれについても引張側最大変位点で、全繰返し回を通じて、残留のたわみ量が存在し、繰返し回数増加につれて、その残留たわみ量が漸増する傾向が見られた (Figs. 12~14 参照)。

次にこれら 3 体の供試体の実験結果について、それらの間の性状相異の著しいのは、圧縮側最大変位を経て、除荷からさらに引張軸力が増大してゆく過程である。即ち SR4C のように短い材では軸方向力 N の変化に比較して、軸方向変位量 Δl 、並びに中央たわみ量 δ の変化が小さく、SR12C のように長いものでは、 N の変化に比して Δl 、 δ の変化が共に大きい。そして SR8C はその中間的な性状を示している。このような圧縮側除荷点から引張側除荷点までの、 $N-\Delta l$ 、 $N-\delta$ 曲線の勾配の相異は長い材と短い材の軸方向力を受けたときの軸方向変位量の性格の相異を表わしていると思われる。このことは換言すれば、繰返し軸力下で部材の細長比が異なれば、材断面でのひずみ分布、及び材軸方向のひずみ分布が、履歴を含めて相異していることを示している。

参 考 文 献

- 1) Murray, N.W.: The Determination of Collapse Loads of Rigidly Jointed Frameworks with Members in Which the Axial Forces are Large, Proc. I.C.E., Part III, Vol. 5, No. 1, 1956, pp. 213-232.
- 2) Paris, P.C.: Limit Design of Columns, Jour. Aeron. Sci., Vol. 21, No. 1, 1954, pp. 43-49.
- 3) Neal, B.G., and D.M. Griffith: The Collapse of Rigidly-Jointed Singly Redundant Light Alloy Trusses, The Structural Engineer, Vol. 141, No. 12, 1963, pp. 399-406.
- 4) 平野道勝・二見秀雄：トラス梁の終局耐力—圧縮型塑性関節，日本建築学会論文報告集，第 66 号，昭 35, pp. 541-544.