

ブレース付き鉄骨ラーメンの実験的研究 (その1)

高橋 泰彦
岡田 宏

概 要

某ビルディングは純鉄骨構造であるが中央コア部分にブレース入りの剛架構を設けて水平力を負担させている。したがって、コア部分のブレースがこの建物の挙動の重要な要素となる。そこで、この建物を対象にブレースの形式をX型、Kトラス型、Z型等に変化させて、ブレースがラーメンの剛性、強度、変形性状、靱性率にどのような役割を果たすか調べるために模型実験とブレースだけの座屈実験を行なった。その結果、架構の耐力はブレースの座屈できるとともに弾塑性挙動におよぼす影響も大きいこと、また、剛性、強度を高めるにはX型ブレースが適当であるが、靱性率が少々低く、Kトラス型は靱性が良好であるのに反し剛性がやや劣ること等が判明した。

1. 序

建設予定の某ビルディングの地上部は純鉄骨構造であるが、中央コア部分に基礎から塔屋まで通じるブレース入りの剛架構を設けて、耐震、耐風の要素とし、ほとんどの水平力を負担させている。したがって、コア部分のブレースがこの建物全体の挙動の重要な要素となる。しかし、圧縮ブレースが建物の挙動におよぼす影響は明らかでなく、現行の鋼構造計算規準では引張ブレースのみを有効としている状態であるが、細長比の小さいブレースが用いられた場合、引張ブレースはもちろん、圧縮ブレースも建物の剛性、耐力、変形性状、復元力特性に大きな影響を与えている。

そこで、この建物を対象にブレースの形式を変化させて、引張、圧縮ブレースがラーメンに果たす役割やブレースが繰り返し塑性変形を受けた時の性状を調べるために、実大の2/3の模型実験と、ブレースの耐力、座屈後の挙動を調べるためにブレースのみを取り出して座屈実験を行なった。

2. ブレース付きラーメンの実験

2.1. 試験体

試験体は図-1, 2に示すごとく圧縮または引張ブレースが単独に存在するRZ型、RJ型、X型ブレースをもつRX型、Kトラス型のブレースをもつRV型、ブレースのないRO型である。ラーメンの部材は全試験体同じで柱は H-250×250×20×28 の溶接H型鋼、梁は補強カバープレート IP12 をつけた C-150×75×9 であり、ブレースは C-125×65×6 2本を

背中合わせにしたものである。また、各部材はガセットプレート IP16 を介して組立てられ、ブレースの接合にはハイテンションボルト φ19 を使用し、標準ボルト張力まで締めつけた。

なお、各部材の断面性能と材料特性を表-1に示す。

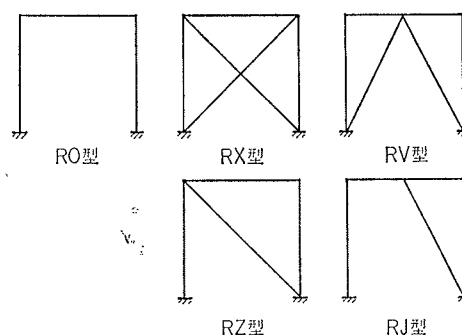


図-1 試験体略図

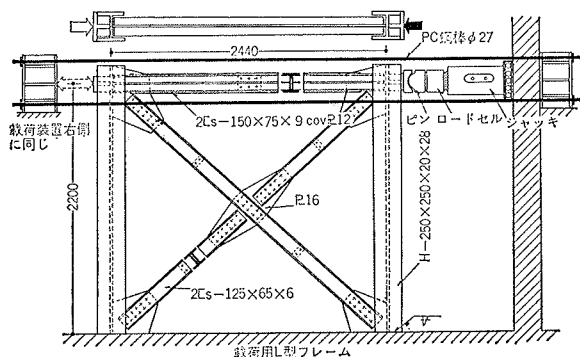
		降伏応力 t/cm ²	最大応力 t/cm ²	ヤング率 t/cm ²	断面積cm ²	断面2次 モーメント cm ⁴
ブレース	C-125	2.15	3.17	1.95×10 ³	34.2	380
梁	C-150	3.17	4.51	2.10×10 ³	120	4700
	H.20	3.39	4.61	2.10×10 ³	178	7300
柱	H.28	2.14	4.02	2.00×10 ³		

表-1 断面性能と材料特性

2.2. 載荷方法および測定装置

載荷は図-2のごとく、柱脚を載荷用大型L型フレームに直接溶接し、200ton ジャッキ2基でピン、ローラー、ロードセルを介して水平左右繰り返し加力を行なった。また、測定は水平変位、ブレースの曲がり、柱脚の浮き上り、ブレース、柱、梁各々の伸縮をダイヤルゲージで、各部材の歪みをストレインゲージ(ゲ-

径長10mm)で行なった。歪み測定にはデジタルストレインメーターを用いて自動記録させた。



図一 載荷図および試験体

2.3. 実験経過

載荷は正負荷重を繰り返したが、正荷重とは RZ 型 RJ 型ではブレースに圧縮力が、また RX 型では 2 部材に分断されたブレースに圧縮力が生じる場合であり、繰り返し載荷はジャッキの移動によって行なった。

各試験体とも第 1 正荷重からブレースに少しずつ面外の曲がりが生じ、負荷重でこの曲がりやが復元した。変形振幅を増加させながらこれを繰り返したが、荷重が大きくなるとブレースの曲がりによるボルト部分のすべりと思われる、ショックを伴う音響がしばしば起こった。ブレースに局部座屈が生じた状態を最終としたが、RJ 型以外のラーメンの部分はブレースにかなりの面外のたわみが起こった時に柱脚が降伏し、これらの試験体では耐力、変形ともブレースの性状が大きな役割を果たしていることがわかる。また、RJ 型ではラーメンに塑性ヒンジが生じてからブレースが座屈した。

各ブレースとも面外曲げがかなり大きくなるまで組立材としてよりも単 1 材としての挙動に近く、局部座屈が起きる大変形となつてから 2 本の C 型鋼の中央部のたわみ量が異なり組立材の挙動となつた。また、ブレースの面外の座屈が生じるにつれて、ラーメン全体もわずかずつではあるが面外に傾きが起きてきた。

2.4. 計算

イ) ブレース付きラーメンの計算

各試験体とも次の仮定のもとで弾性計算を行なった。

1. 部材は線材とする。
2. ラーメンの接合部、柱脚とも剛接とする。
3. ブレースの端部はガセットプレートの面外曲げ剛性が小さいのでピン接合とする。

ロ) ブレースの座屈計算

次の仮定で Engesser-Shanley の Tangent Modulus 理論により計算した。

1. 中心圧縮単 1 部材とする。
2. 部材長は C 型鋼の長さとする。
3. 比例限度以上の σ - ϵ 曲線は DIN 4114 より次式を用いる。

$$\tau = 1 - (\sigma_{cr} - \sigma_p) / (\sigma_y - \sigma_p)^2$$

$$\tau = T/E$$

σ_{cr} : 座屈応力 σ_p : 比例限度 σ_y : 降伏応力

T: Tangent Modulus E: Young Modulus

4. 素材試験より $\sigma_p/\sigma_y = 0.7$, $E = 1.95 \times 10^3$ t/cm² を用いる。

2.5. 実験結果および考察

2.5.1. 全体変形 図一 3 に各試験体の荷重—全体変形の関係を示す。この変形量は両側の柱頭部分の水平移動の平均値であり、また荷重はブレースの圧縮応力に換算してある。これを見ると挙動が 3 種類に分類できる。すなわち、イ) 降伏荷重の明確な RX, RV 型、ロ) 降伏荷重の不明確な RJ, RO 型、ハ) ブレースの座屈後の繰り返しのより耐力が徐々に低下する RZ 型の 3 種類である。

RX, RV 型ともに初期剛性は計算値と比べ 15% 程度低く、また座屈荷重の 83%, 72% 程度で勾配はゆるやかになるが、ブレースの完全座屈荷重は計算値と良く一致する。そして、座屈後の耐力もほとんど低下せず一定荷重を保っている。ただし、ヒステリシスループの勾配は繰り返すたびにゆるやかになる。これは座屈したブレースの伸び剛性や Baushinger 効果のためであるが後述する。両者の最大荷重は RX 型が 115ton, RV 型が 80ton と約 3 : 2 の割合であり、剛性が 4 : 3 の比率であるが、ブレースの形式の差と考えられる。また、靱性率は RV 型が RX 型より良好である。しかし、RV 型の靱性は梁の曲げ剛性によって著しく変化することが考えられる。梁の曲げ剛性が比較的小さければブレースの伸縮を梁が緩和させる役目を果たし靱性は良くなる。

次に、ブレースのない RO 型は梁端、柱脚の順に塑性ヒンジが生じ崩壊に到るが、局部降伏の影響が大きいためか降伏点も明らかでないゆるやかな曲線が描かれている。ラーメンに取り付けられたブレースの断面が小さい場合、または負担する荷重が小さい場合には、この RO 型の挙動と類似するはずである。例えば、RJ 型の性状は耐力、剛性には違いはあるが、ブレースに働く力が圧縮、引張にかかわらず RO 型と良く一致している。すなわち、ブレースの水平力負担率が小さく、ブレースが座屈する前にラーメンに降伏が起るためである。

RZ 型の初期剛性は RV 型に匹敵するほど高いも

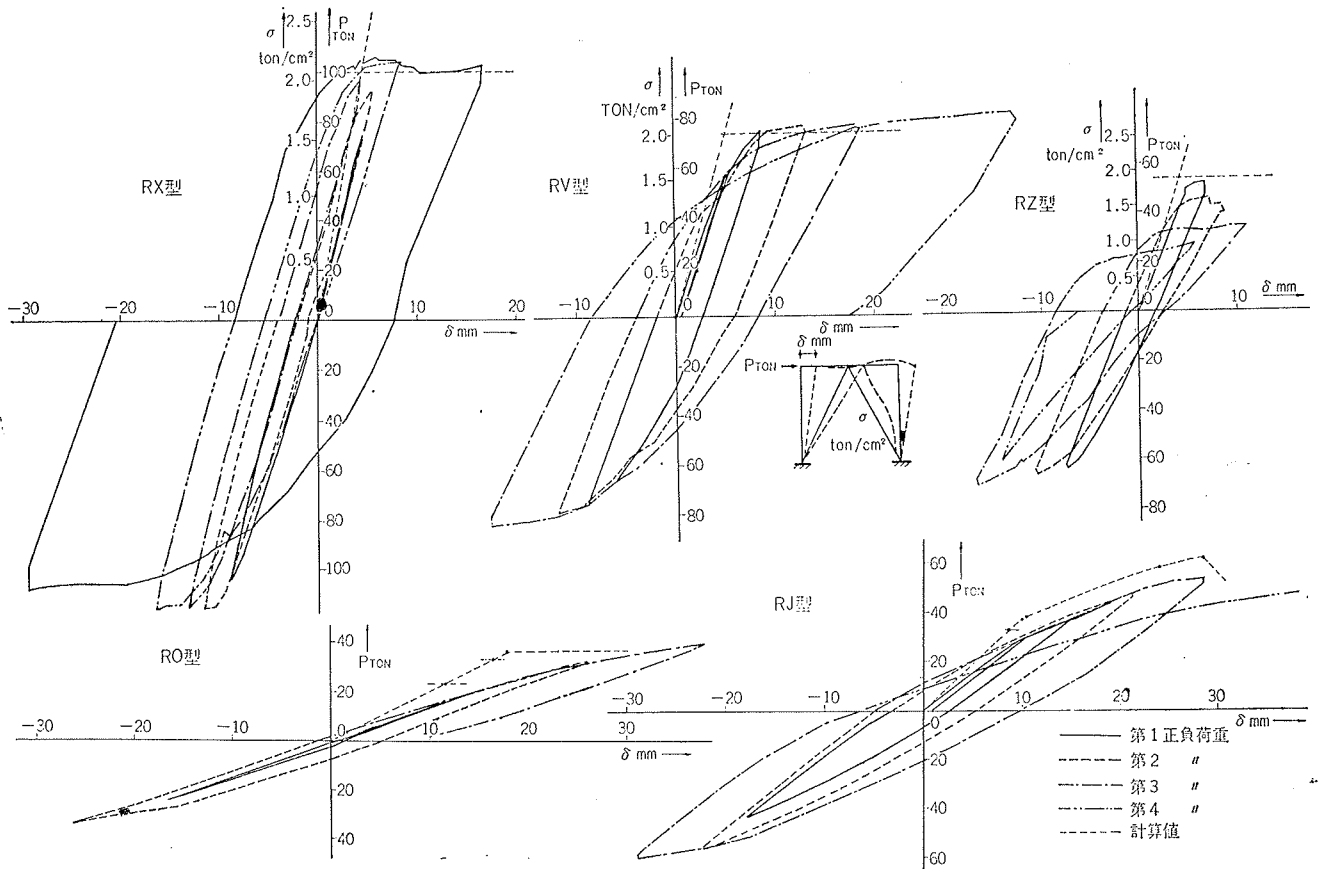


図-3 荷重-変形曲線

のであるが、RZ型の挙動はブレースに圧縮力が働く場合と引張力が働く場合とで著しく異なる。ブレースが座屈した後、繰り返し荷重によって引張ブレースは剛性が低下する程度で耐力的には問題とならないが、圧縮ブレースの耐力の低下は著しい。また、非常に小さい変形でブレースに局部座屈が生じ靱性率も低い。

実際の建物では片ブレースということはありませんので問題とはならないが、RZ型では過度の力をブレースに負担させるので小さな変形で座屈する。剛性は低くても、RJ型の方が良好と思われる。

各試験体の第1正荷重の剛性を図-4に示す。RX, RV, RZ, RJ, ROの比が14:10:8.3:2.7:1.0でRJ型以外のブレースはきわめて有効であることがわかる。また、RO型以外の耐力は105, 77, 53, 54tonで、だいたい2:1.5:1:1である。

2.5.2. ブレースの挙動 図-5は各試験体の荷重-変形曲線からRO型の荷重-変形曲線を減じたものであり、ブレースのみの挙動を示している。

初期剛性は計算値よりもかなり低く、この影響が全体の変形の剛性の低下となってあらわれてくる。この原因として、ブレースの初期たわみ、局部降伏等が考えられる。また、座屈耐力は良く一致している。

圧縮、引張のブレースをもつRX, RV型では圧縮ブレースの座屈後も引張ブレースが有効に働くために耐力はゆるやかに低下してゆき、さらに、その低下部分はラーメンが負担するために全体の荷重は一定値を保っているが、片ブレースのRZ型は急激に耐力が低下している。また、ブレースの中央部に局部座屈が起った時の水平変位もRV, RJ, RX, RZの順に少くなり、ブレースの形から考えるとV型がX型より良好な挙動を示すといえる。

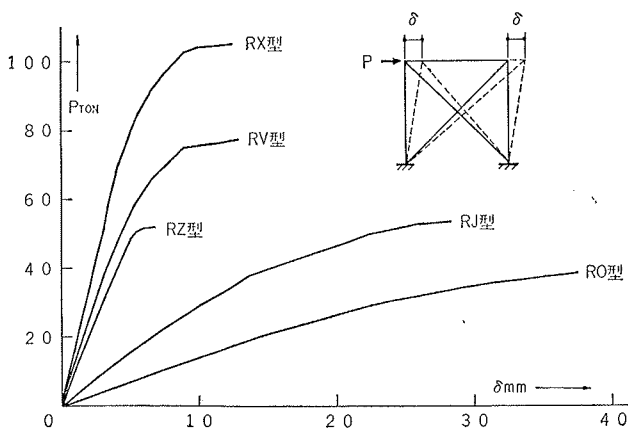


図-4 初期剛性の比較

図-6にブレース断面の歪分布を示す。図示してい

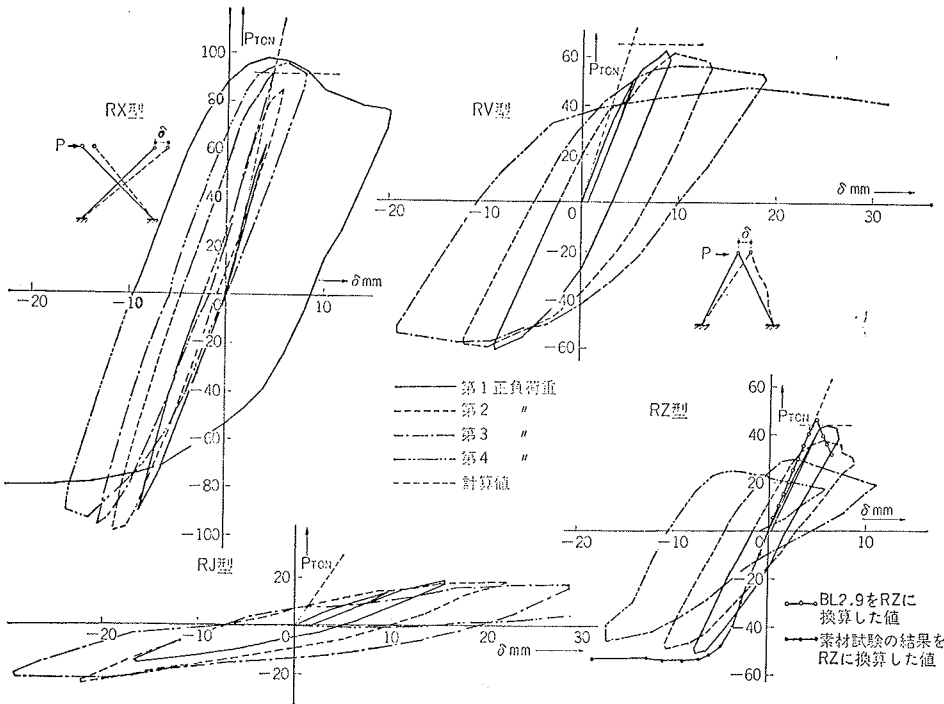


図-5 ブレースの荷重-変形曲線

るのはRV型であるが、他の試験体もだいたい同様の結果である。圧縮ブレースは50ton まで一様な歪分布を示すが、それ以後は曲がりが生じ60ton では凹部は降伏し、凸部では歪みの減少がみられる。引張側ではほぼ等分布であるが歪が1000 μ をこえると乱れてくる。また、図-7はブレースの面外たわみ量であるが、60ton あたりからたわみが増加してくる。これは歪分布の傾向と一致する。座屈した後に引張力を加えるとたわみは減少するが、繰り返し载荷によって残留

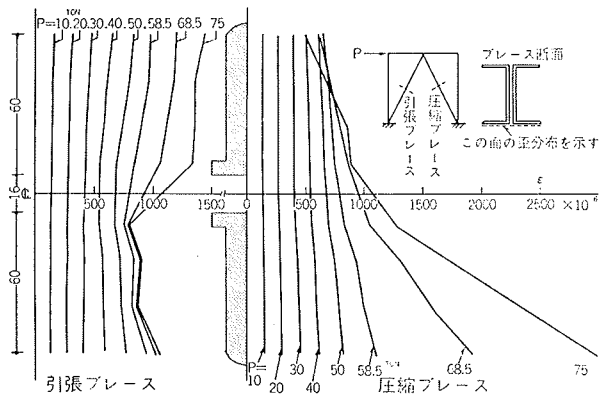


図-6 ブレースの歪分布

たわみは増加し、また残留たわみが増すにつれてブレースの圧縮および伸び剛性は著しく低下してくる。
2.5.3. 剛性低下 前述したごとく、繰り返し载荷によってヒステシスループの勾配は徐々にゆるやかになってくる。この剛性の低下を図-8に示すように2通りの方法で整理した。すなわち、剛性としてルー

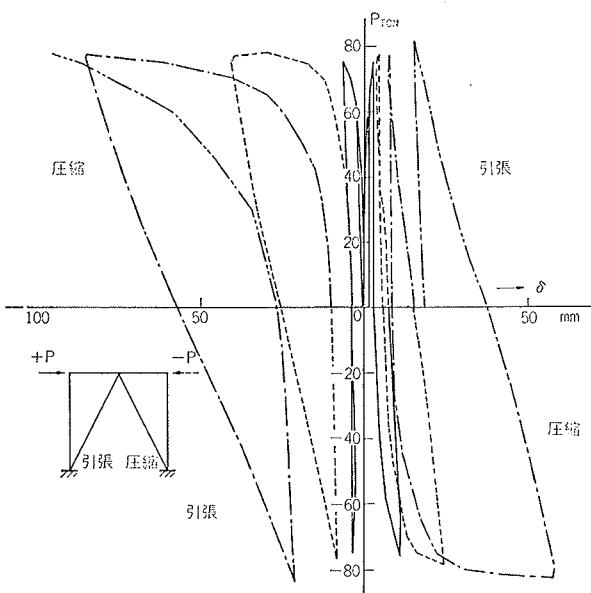
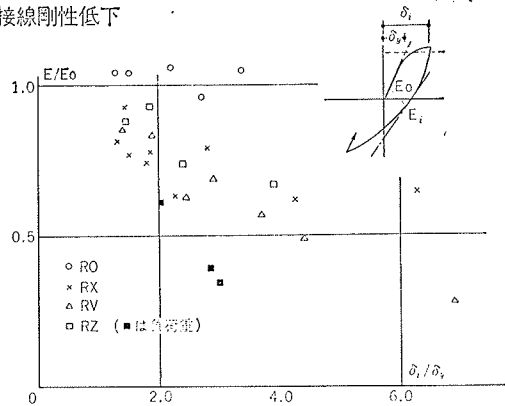


図-7 ブレースの面外たわみ

接線剛性低下



割線剛性低下

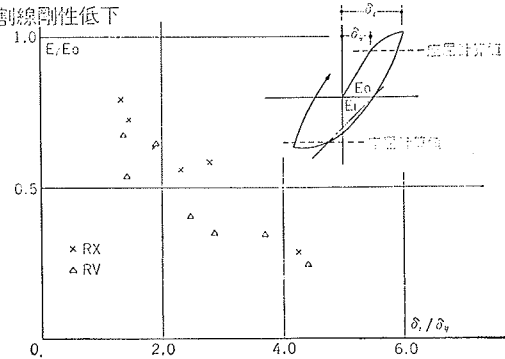


図-8 剛性低下率

プの荷重0のときの接線をとる方法と荷重0の箇所とブレースの座屈荷重計算値の点を結ぶ割線をとる方法である。図-8にはかなりの乱れがみられるが、全体的にみてRO型では剛性の低下はない。しかし、その他の形式では δ/δ_y の増加につれて二次曲線的に低下する。接線剛性の低下は非常にゆるやかで変形が $4\delta_y$ (座屈荷重時の変形の計算値) の時、 $0.6E_0$ である。また、割線勾配はかなり急激に低下し、 $0.3E_0$ である。RX と RV 型と比べると RX の低下がわずかに少く、RZ 型では正荷重と負荷重の剛性の違いが大きい。これは、ブレースが座屈した後の伸び剛性の低下や、ブレースに逆に引張力が働いた時でも曲がり完全に復元しないことによる曲げ剛性の低下の影響と考えられる。

2.6. 結論

- 1) 各試験体とも初期剛性は計算値より少々低いが、耐力はかなり良く一致している。
- 2) ブレースの挙動にも1)と同様のことがいえる。
- 3) ブレースが座屈した後のブレースの負担する荷重は低下する。この傾向は片ブレースの時に特に著しい。
- 4) 強度、剛性を高めるにはX型のブレースが有効であり、靱性率を高めるにはKトラス型が有利である。
- 5) Kトラス型のブレース付きラーメンの挙動は梁の曲げ剛性の影響が大である。
- 6) ブレースの面外局部座屈で最大耐力がきまる。
- 7) 繰り返しによる剛性の低下率はバラツキが大きい。接線剛性では $4\delta_y$ の変形で $0.6E_0$ まで低下する。また、低下率はKトラス型よりX型の方が、少々小さい。

3. ブレースの座屈実験

3.1. 概要

前項の実験で明らかかなようにブレースがラーメンの耐力、剛性、変形性状におよぼす影響は大きいものである。引張ブレースの挙動はかなり推測し得るが、組立材の圧縮ブレースは座屈耐力や座屈後の性状に関して不明の点が多々ある。しかも、端部の接合条件、偏心等の影響を受け、ラーメンに与える影響も複雑である。そこで、ブレース付きラーメン試験体からブレースのみを切り出した形の単材の試験体を作成し、座屈実験を行なった。

3.2. 試験体および測定法

図-9のごとく、両端にガセットプレートをもつ、ハイテンボルトによって組立てられた2本の $\square-125 \times 65 \times 9$ の試験体である。長さはラーメン試験体の RV, RX, RZ 型

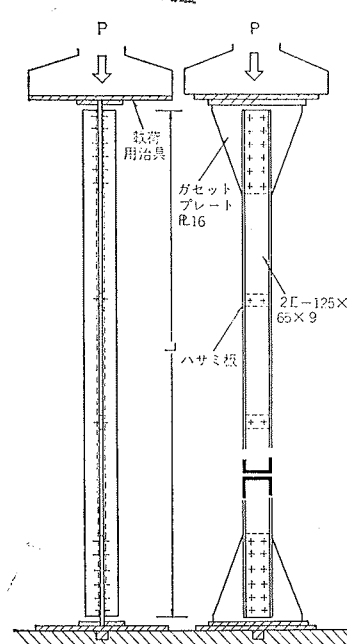


図-9 試験体および载荷図

に対応したものの他に4種類を加えて計7体で、名称は BL とし、そのうしろに試験体の長さをあらわす数値をつけて BL 1.4, BL 3.3 のごとく名付けた。細長比は 33~102 の範囲で、すべて面外の塑性座屈を起こす。

加力は上下に凹型の治具につけてガセットプレートの部分に圧縮力を加えた。

なお、使用鋼材はラーメン試験体のブレース部分と全く同じである。

測定はダイヤルゲージで試験体の縮み、横たわみを、また、ストレインゲージで中央部の曲がりの状態と歪み分布を調べた。

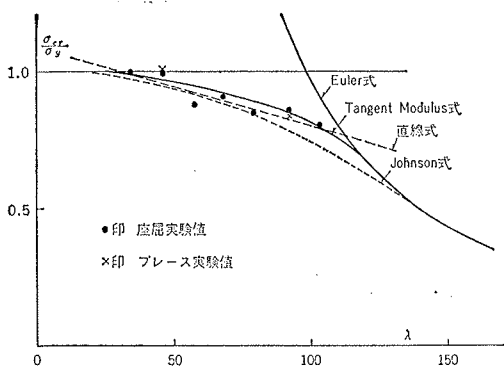
3.3. 実験結果および考察

座屈荷重を計算値とともに表-2に、また無次元化して図-10に示す。荷重-横たわみ量、荷重-部材の縮み量を各々図-11、図-12に示す。なお、図-10の×印はラーメン試験体のブレースの座屈荷重をあらわ

試験体	BL3.3	BL2.9	BL2.5	BL2.1	BL1.8	BL1.4	BL1.0
結果							
長さ: Lmm	3300	2900	2500	2100	1800	1400	1000
細長比	102.5	91.5	78.6	67.5	57.3	45.7	33.6
座屈荷重	実験値TON	59.1	62.5	62.5	67.0	64.5	72.7
	計算値TON	60.4	64.7	67.3	69.3	70.6	71.7
重	実験値	0.98	0.97	0.93	0.97	0.91	1.01
	降伏荷重	0.81	0.85	0.85	0.91	0.88	0.99
ハサミ板の数	4	3	3	2	2	1	0

但し、BL2.9はRZ型に、BL2.1はRV型に対応する。

表-2 実験結果



図一10 座屈応力—細長比関係

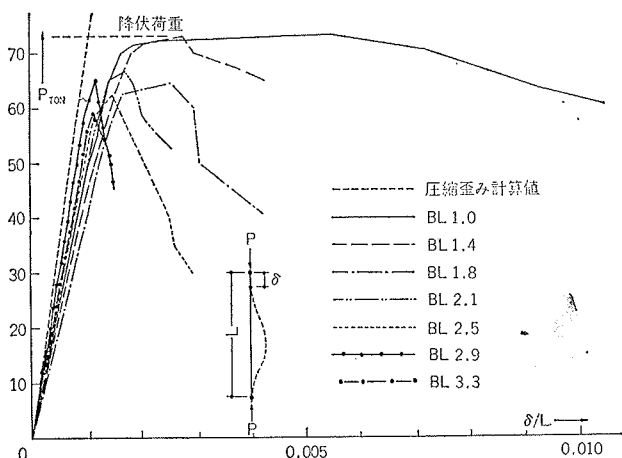
す。計算は前章の場合と同様に単一材の中心圧縮塑性座屈と考えて Tangent Modulus 理論を用いて行なった。ただし、载荷にあたってかなり調整をこころみしたが、治具と試験体のガセットプレートの間が密着せず、不可避の偏心を認めた。しかし、量的に不明確なために、これを無視している。

ラーメン試験体 RZ, RV, RX 型のブレースの座屈応力を含めて、実験値の座屈応力は細長比 $\lambda=50$ より小さい範囲ではほぼ降伏応力に近く、細長比が増加するにつれて直線的に低下し、 $\lambda=100$ で $0.8\sigma_y$ 程度になる。すなわち、 $\sigma_{cr}/\sigma_y = -0.00285\lambda + 1.0855$ の直線に近似し、Tetmajer の直線式の形となる。

これらの値を Tangent Modulus 理論の ν (比例限度/降伏応力) $=0.7$ の二次曲線式と比較すると $\lambda < 50$ $\lambda > 90$ の範囲ではかなり良く一致するが、その中間の範囲では計算値より少々低い座屈応力を示している。しかし、平均的にみると実験値/計算値 $=0.97$ で良い結果ともいえる。

また、ラーメン試験体のブレースの座屈応力は単材の結果ときわめて良く一致している。

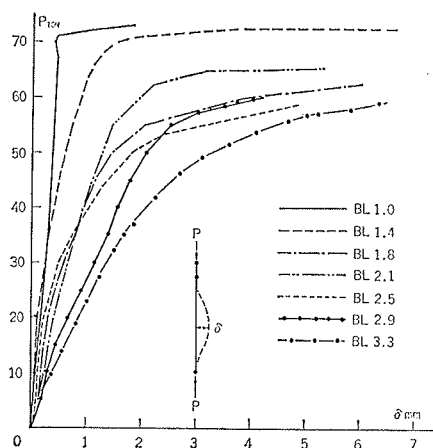
次に、図一12で座屈以後の挙動をみると、細長比の小さな BL 1.0, BL 1.4 では座屈後の耐力の低下が



図一12 荷重—縮み量曲線

ゆるやかで、細長比の大きな BL 3.3, BL 2.9 等では座屈すると耐力は急激に低下している。この BL 2.9 の荷重—縮み量の結果を RZ 型のブレースの耐力曲線に換算したものを図一5に併記している。初期勾配を比較すると BL 2.9 の方は計算値とよく一致し、ブレースは15%くらい低い。また、耐力低下の勾配は両者ともかなり傾向が似ているが、最大荷重を維持する状態がかなり異っている。やはり、ブレースはラーメンから圧縮力の他に曲げやせん断力を受けると同時に、座屈後もラーメンの影響を受け単純な座屈実験の挙動とはならないようである。

図一12は試験体の全縮み量を歪みに換算したもので圧縮歪みと単位長さに関する曲げ縮みを含んでいる。図は省略したが、各試験体とも圧縮歪みは計算値とよく一致し、図一12の点線に近い。したがって、この計算値の点線と実験値との差が曲げによる縮みであり、



図一11 荷重—横たわみ曲線

全体の10~50%を占め、材長の大きなものほど曲げによる影響は小さいようである。

また、部材中央のたわみを示す図一11をみても明らかのように、荷重が低い時から部材は曲がり始め、中央の歪み分布にもその傾向がみられる。これらの性質はラーメン試験体のブレースにもあらわれ、また、曲がり方も類似していた。

3.4. 結論

- 1) 座屈応力—細長比の関係は Tangent Modulus 理論とかなり良く一致するが、二次曲線よりはむしろ、直線的である。
- 2) 座屈後は耐力の低下をみるが、細長比の小さいものほど低下がゆるやかである。
- 3) 単材の座屈実験の結果をラーメン試験体のブレースの変形に換算すると剛性は少々高いものになる。また、最大耐力の持続状態も違っているが、これは

ラーメンの影響と思われる。

- 4) 全体の縮み量は圧縮縮みの他に10~50%の曲げ縮みが含まれる。

参考文献

1. 繰り返し水平荷重を受けるラーメンの性状：
若林実，辻文三
2. 繰り返し荷重を受ける鋼構造物の弾塑性における挙動に関する研究：藤本盛助，松本芳紀
3. 交番繰り返し力を受けるH型鋼架構の塑性挙動：
五十嵐定義，多賀直恒
4. 組立て圧縮材の座屈に関する実験的研究：
若林実，野中泰二郎，小城修
5. 単一山型鋼の座屈耐力に関する実験的研究：
横尾義貫，若林実，野中泰二郎