

ブレース付き鉄骨ラーメンの実験的研究 (その2)

竹 本 靖
高 橋 泰 彦
岡 田 宏

概 要

ブレース付きラーメンの模型実験を行ない、種々の型のブレースをもつラーメンの剛性、耐力、変形状等に関しては前報で詳しく述べた。そこで、この報告では前報で扱わなかった山型鋼ブレースの実験結果について述べるとともに、圧縮ブレースの座屈と座屈後の挙動に主眼をおいて、静荷重に対するブレースとブレース付きラーメンの性状の理論解析を行なった。その結果座屈後の塑性域の性状については、細長比の小さい部材では計算値と実験値とはかなりの相違があるが、細長比の大きい部材や、引張、圧縮両ブレースをもつ場合には共通点があることがわかった。

1. 序

近年、構造物は大型化、高層化の傾向が著しく、将来もこの傾向は続くと思われる。その場合、地震または台風時に構造物が受ける水平力は非常に大きくなり、耐震壁やブレースを構造体にとり入れることが必要となるが、それらの性状はまだ完全に明らかにされているとは言えない。

そこで某ビルディングのブレース構造の実験を行なうのを契機にブレースの挙動を把握すべく実験と理論解析を試みた。実験結果については前報で詳しく述べたので、その残りを記すとともブレース構造の計算値と実験値の比較を行ない第2報とした。なお、この報告では圧縮ブレースも設計上有効と考えているために、圧縮ブレースの挙動に主眼をおいた。

2. 山型鋼ブレース付きラーメンの実験

2.1. 試験体および荷重方法

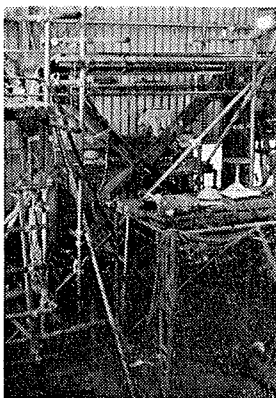


図-1 荷重状態

試験体は前報 (その1) のRX型と形、寸法とも同じであり、RXL型と名付ける。ただし、ブレース材だけが異なり、RXL型ではL-130×130×9 ($\sigma_y=3.19$, $\sigma_{max}=4.73\text{ton/cm}^2$)で、2本をX型に配置し、中央交叉部をボルト締めしてある。

なお、荷重方法、測定方法はRX型と全く同じで図-1に概要を示す。

2.2. 実験結果および考察

全体の水平荷重(P)-水平変位(δ)曲線を図-2に、ブレースのみのP- δ 関係を図-3に、ブレースの面外たわみ量、歪分布をそれぞれ図-4、図-5に示す。

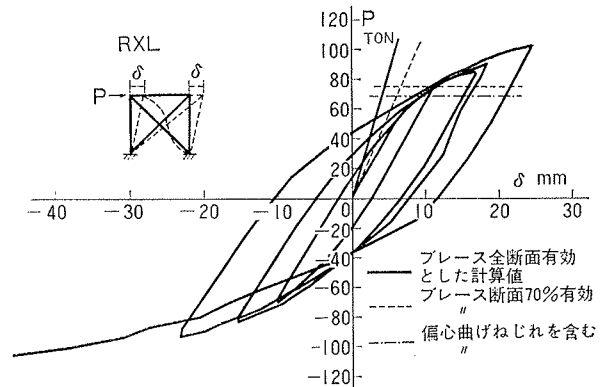


図-2 荷重-水平変位曲線

2.2.1. 全体変形について 図-2のP- δ 曲線はP=60tonで曲がり始め、ブレースがほぼ座屈した荷重70tonで再び直線性をとりもどし、100tonでさらに剛性は低下する。この間、ブレースは低荷重時から面外に曲げねじれが生じ(図-4)、70tonで圧縮ブレースの座屈が顕著になり、75tonで引張ブレースが降伏する。その後、ブレースはほぼ一定荷重を維持する。したがって、p- δ 曲線が70tonを越えて再び直線となるのはラーメンの弾性剛性のためである。

また、繰り返し荷重によりループにはRX型より10%程大きい剛性の低下がみられるが、靱性率が大きく耐震的に良好である。しかし、面外のねじれたわみが増すにつれて部材中央に局部座屈が生じ、またラーメン全体のねじれがRX型より大きいなどの問題もある。

2.2.2. 強度について RXL 型のブレースは偏心圧縮で曲げとねじれを受けて塑性座屈をおこす。解析はこの所報掲載の「山型鋼の偏心圧縮による座屈」に述べられている方法で行ない、結果を図-3に一点鎖線で示す。この耐力は64.6tonでほぼ実験値に一致し、解析結果は良好である。

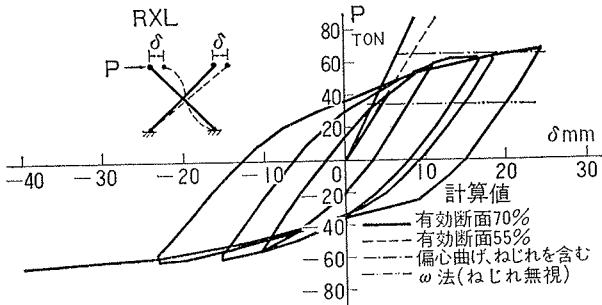


図-3 ブレースのみの p-d 曲線

次に、ブレースのねじれを無視して次式の omega 法

$$\frac{\omega N}{A} + \frac{N \cdot e}{Z} = \sigma_y$$

N: 軸力 A: 断面積 e: 偏心量 Z: 断面係数で計算すると許容応力は33.4tonで前述の計算値や実験値の50%である。したがって、ねじれを無視してブレースを設計しても約2倍の安全率があることになる。しかし、ラーメン全体で考えた場合は図-2にみる如く、ブレース座屈後も荷重はなお増加し、計算荷重の30%以上も高い荷重に耐える。最大荷重はブレースよりもラーメンの崩壊できまっている。

2.2.3. 初期剛性について 初期剛性はブレース全断面を有効として計算した剛性の約半分である。そこで、図-3からブレースの有効断面を逆算すると約55%で、全体の初期剛性の低下はブレースに起因していることがわかった。しかし、前報で述べた如く、偏心のない実験値でも計算値より15%低い。したがって、この場合の山形鋼ブレースの有効断面は約70%で、30%が偏心圧縮、引張による曲げ、ねじれによって低下したと推測される。

2.2.4. ブレースの挙動 図-3の RXL 型のブレースだけの性状はRX型に比較して、初期剛性が低く、50tonあたりから剛性が著しく低下する点は劣るが、座屈後の荷重低下の現象がなく、むしろゆるやかに上昇している点は優れている。

剛性が低く、しかも途中から低下するのは曲げとねじれのために起ったものであり、図-5の歪分布でも、低荷重時から圧縮ブレースに引張歪みが、引張ブレースには圧縮歪みが生じている。なお、中立軸は荷重が増加してもほとんど変化しないことは興味深い。ブレースの最終状態を図-6に示す。

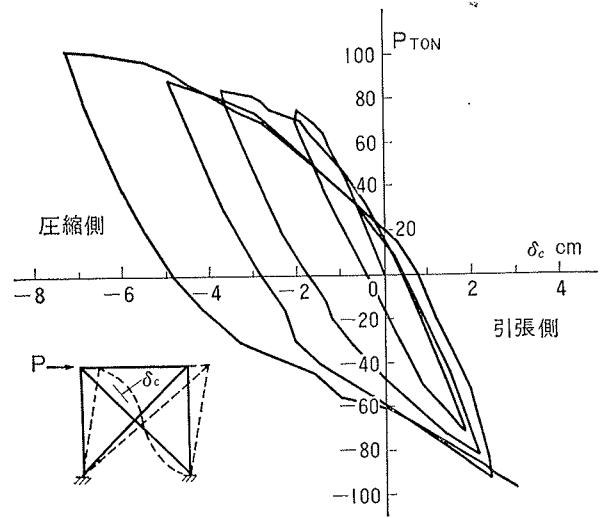


図-4 荷重-ブレースの面外たわみ曲線

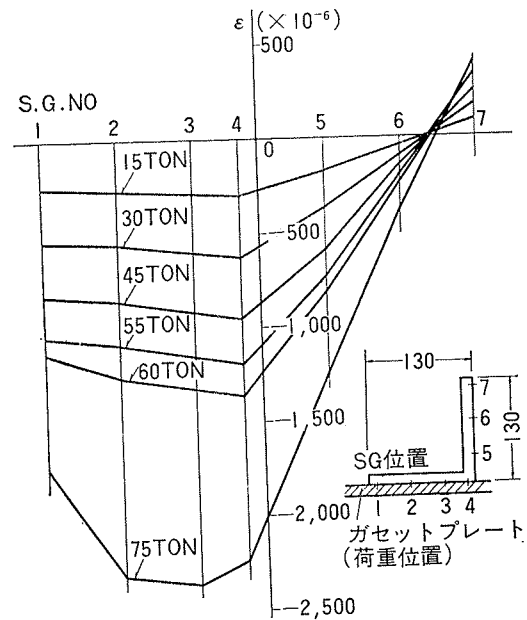


図-5 ブレースの歪分布

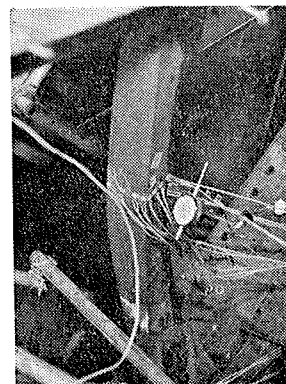


図-6 最終状態

2.3. まとめ

- イ) RXL 型の剛性は低い、靱性は良好である。
- ロ) ブレースが座屈または降伏しても最大荷重を保持している、ラーメン全体の耐力は高く、ブレースの座屈荷重で設計するとかなりの余力がある。
- ハ) 繰り返し载荷による剛性の低下はRX型より大きく、変形が増すにつれてラーメンに倒れが生じる。

参考文献

- 1) 山型鋼の偏心圧縮による座屈；
大林組技術研究所報 No. 4 岡田宏, 高橋泰彦

3. 実験値と解析値の比較

3.1. 実験

前報の(その1)で述べたのでここでは解析の対象とする実験と試験体名称について簡単にしす。実験は次の2種類である。

実験1 ブレース付きラーメンの実験

図-7のごとく1層1スパンのブレース付きラーメンの試験体で、ブレースの形式によってRO, RX, RV, RZ, RJ型と名付ける。試験体は実大の $\frac{2}{3}$ のラーメンで、水平力の繰り返し加力を行なった。目的はラーメンの挙動と引張、圧縮両ブレースの挙動を調べることである。

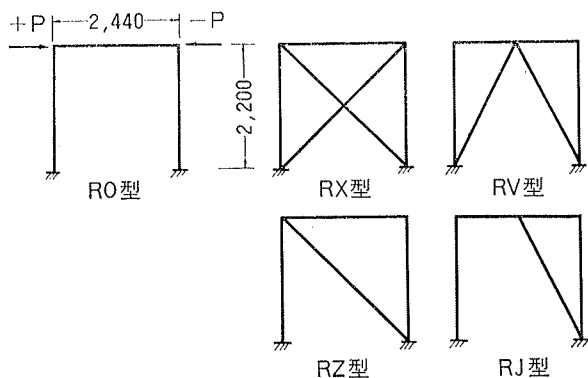


図-7 試験体略図

実験2 ブレースの座屈実験

実験1の試験体からブレースのみを切り出した形の試験体(図-8)の座屈実験で圧縮ブレースの耐力、座屈後の挙動を調べた。なお、実験1, 2ともブレース材はC型鋼2本を背中合わせにしたものである。

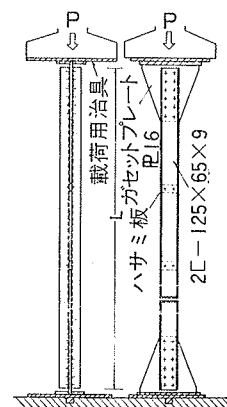


図-8 試験体および载荷図

3.2. 解析法

解析は図-7, 8に示す

試験体を対象にして、ブレースの挙動とブレース付きラーメンの挙動の解析の2項目に分けて行なう。なお、使用する記号には次の意味をもたせる。

- N: 軸力 P: 水平力 A: 断面積 λ : 細長比 l : 部材長 Δl : 軸方向変形 Δl_N : 軸力による Δl
- Δl_M : モーメントによる Δl , δ : 水平変位 δ_C : 部材中央の面外たわみ

3.2.1. ブレースの挙動の解析

解析に際し次の仮定をもうける。

- イ) 材料の σ - ϵ 関係は完全弾塑性(図-9)とする。
- ロ) 塑性域でも部材の断面保持は成り立つ。

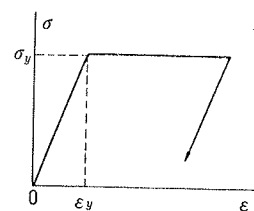


図-9 σ - ϵ 曲線

- ハ) ブレース両端はピン接合で、座屈後のたわみ曲線は正弦曲線とし、たわみ量は微小と考える(図-10)。
- ニ) ブレース部材はH型の線材断面とする(図-11)。

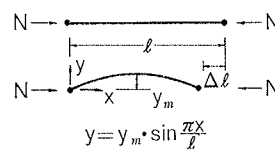


図-10 たわみ曲線

- ホ) 局部座屈は起こらず、残留応力は考慮しない。
- ヘ) せん断力の影響は無視する。

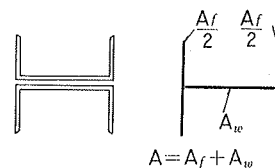


図-11 断面の仮定

3.2.1.1. 引張ブレースの挙動

素材の引張試験から推測できるが、この解析では仮定イ)に基づいた単純な挙動と考える。

3.2.1.2. 座屈荷重 弾性座屈には Euler 式、塑性座屈には DIN 4114 に用いられている Tangent Modulus 理論より計算する。

3.2.1.3. 座屈前の挙動 軸力による軸方向変形のみで $\Delta l_N = Nl/EA$ から計算する。

3.2.1.4. 座屈後の挙動 仮定イ)ロ)ハ)を用いて、座屈した部材中央の歪分布と、たわみ曲線から得られる2種類の曲率を一致させることによって、応力分布、軸力、曲げモーメントを計算し、 N - Δl の関係を求める。座屈した状態で考えられる歪分布を図-12のごとく6種類に分け、次に示すような釣合式をたてて計算する。

a) 弾性域 弾性座屈後の挙動に適用する。(図-12)

曲率 歪分布より $\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{h}$

たわみ曲線より $\frac{1}{\rho} = \frac{\pi^2}{l^2} \cdot y_m$

軸力の釣合 $N = EA \cdot \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2}$

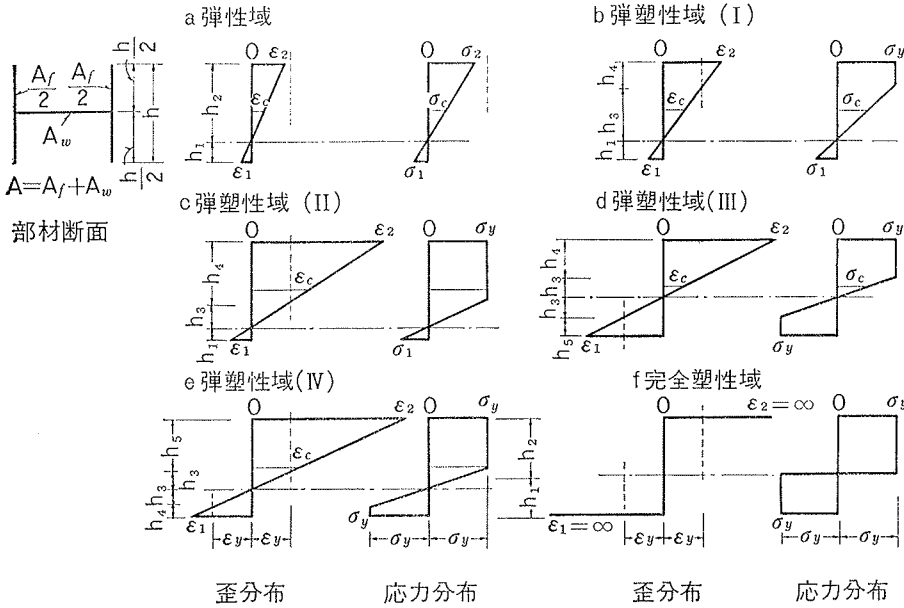


図-12 弾塑性域の歪分布, 応力分布

モーメントの釣合

$$y_m = -\frac{Eh}{2N} \left[A_f \cdot \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{3} + A_w \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2} \right] - \frac{h}{2}$$

軸方向変形 $\Delta l = \Delta l_N + \Delta l_M = \frac{N \cdot l}{EA} + \frac{\pi^2 y_m^2}{4l}$

b) 弾塑性域 (I) 座屈後 $\varepsilon_2 > \varepsilon_y$ になった時に適用
軸力の釣合 $N = E \left[A_f \left\{ \varepsilon_y - \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_y)^2}{2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right\} + A_w \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2} \right]$

モーメントの釣合

$$y_m = \frac{E \cdot h}{2N} \left[A_f \left\{ \varepsilon_y - \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_y)^3}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \right\} + A_w \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2} \right] - \frac{h}{2}$$

c) 弾塑性域 (II) $\varepsilon_1 < \varepsilon_y, \varepsilon_c > \varepsilon_y, \varepsilon_2 > \varepsilon_y$ の時

$$N = E \left[A_f \left\{ \varepsilon_y - \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_y)^2}{2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right\} + A_w \cdot \varepsilon_y \right]$$

$$y_m = \frac{E \cdot h}{2N} \left[A_f \left\{ \varepsilon_y - \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_y)^3}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \right\} + A_w \cdot \varepsilon_y \right] - \frac{h}{2}$$

d) 弾塑性域 (III) $\varepsilon_1 > \varepsilon_y, \varepsilon_2 > \varepsilon_y$ の時

$$N = E(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \left\{ \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot A_f + \frac{A_w}{2} \right\}$$

$$y_m = \frac{E \cdot h \cdot \varepsilon_y}{2N} \left[A_f \left\{ 1 - \frac{4\varepsilon_y(3\varepsilon_1 - \varepsilon_y)}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} - \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_y)^2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \right\} + A_w \right] - \frac{h}{2}$$

e) 弾塑性域 (IV) $\varepsilon_1 > \varepsilon_y, \varepsilon_c > \varepsilon_y, \varepsilon_2 > \varepsilon_y$ の時

$$N = E\varepsilon_y \left\{ A_f \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} + A_w \right\}$$

$$y_m = \frac{E \cdot h \cdot \varepsilon_y}{2N} \left[A_f \left\{ 1 - \frac{4\varepsilon_y(3\varepsilon_1 - \varepsilon_y)}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} - \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_y)^2}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2} \right\} + A_w \right] - \frac{h}{2}$$

f) 完全塑性 $\varepsilon_1 = \infty, \varepsilon_2 = \infty$ 塑性ヒンジの状態

$$y_m = \frac{h}{2N} (N_y - N) \left(1 - \frac{N_y - N}{2A_f \sigma_y} \right)$$

上式を用いて試錯法により、歪分布の曲率とたわみ曲線の曲率を一致させる $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ を求め、 $N-\Delta l$ 曲線を計算する。

3.2.2. ブレース付きラーメンの解析

ラーメンは Simple Plastic Theory を用いて塑性ヒンジが形成される順序を追って荷重-変形曲線を計算し、引張、圧縮ブレースはそれぞれ、3.2.

1.1, 3.2.1.4 から $N-\Delta l$ 曲線を求める。その結果から変形量をパラメーターにして三者を組み合わせ、ブレース付きラーメンの $P-\delta$ 曲線を決定する。

3.3. 圧縮ブレースの解析と実験値との比較

前報(その1)の「ブレースの座屈実験」の項の実験値と前節から求めた計算値との比較を行なうが、座屈荷重に関しては前報で述べたので省略し、 $N-\Delta l$ の関係のみを扱う。

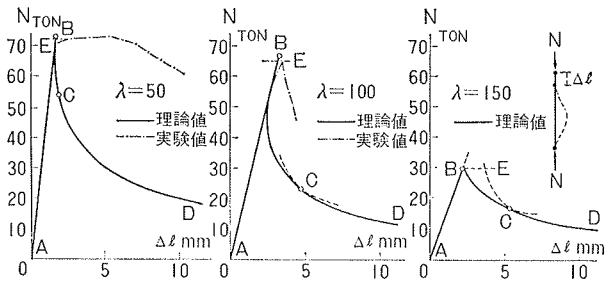


図-13 荷重-軸方向変形曲線

$\lambda = 50, 100, 150$ の3種類の部材の計算結果を図-13に示す。図中の A-B, B-C, C-D の部分がそれぞれ弾性, 弾塑性, 完全塑性の状態に対応し、Eが座屈荷重を表す。実験値は BL 3.3 ($\lambda = 103$), BL 1.4 ($\lambda = 46$) の結果である。

計算値では座屈後、 Δl が一時的に減少するとともに、荷重も急激に低下するが、実験値には Δl の減少は見られず、また、BL 1.4 ではかなりの変形量まで最大荷重を維持している。しかし、BL 3.3 では座屈後急激に荷重が低下し、計算値の傾向と似ている。 $\lambda = 150$ には対応する実験値はないが、計算値によると Euler 荷重で曲がり始め、荷重はゆるやかに低下し、変形がかなり進んだ状態で完全塑性となる。なお、塑性ヒンジが形成される変形量は λ が大きい部材ほど大きい。

計算値で座屈後に Δl が減少するのは軸力低下によ

る ΔN の減少が曲げたわみによる軸方向縮み (ΔL_M) の増加より大きいので、 λ の増加につれてこの傾向はなくなる。また、座屈後の荷重低下が急激なのは、部材を線材断面に置換したことによる影響もあるが、 λ の小さい部材ほどこの傾向が大きいことから推測すると材料の歪硬化を無視したためであろう。東京大学、加藤教授の研究にも歪硬化の重要性が指摘されている。

次に、部材中央の面外たわみ量で検討する(図-14)。実験値は元たわみのために初めから曲がりが生じ、BL 1.4 で2mm, BL 3.3 で5mm で座屈計算荷重まで達した後、荷重は低下し、変形は著しく進行する。計算値は E, A-B がそれぞれ座屈荷重、座屈後の挙動である。

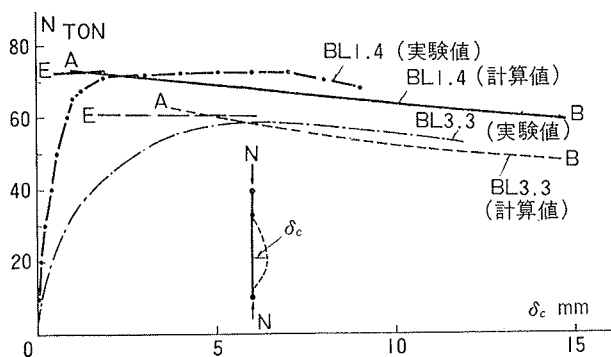


図-14 荷重—面外たわみ曲線

この図で両者を比較するのは困難であるが、大ざっぱにみると BL 1.4 では最大荷重を持続する状態は異なるが、両者とも荷重低下の勾配は一致する。ただし、元たわみのない試験体でより正確な比較を行なう必要がある。

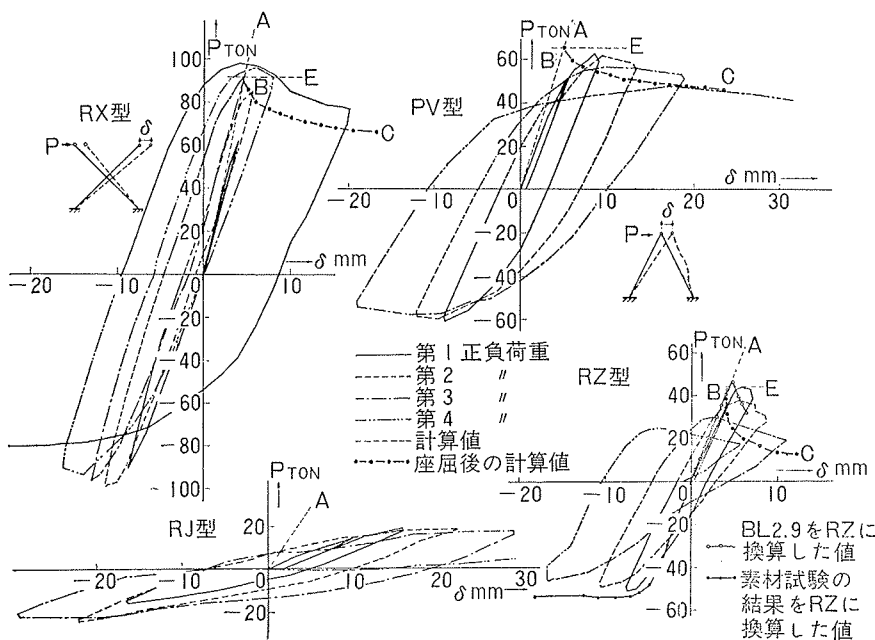


図-15 ブレースの荷重—変形曲線

3.4. 圧縮、引張両ブレースの解析と実験値との比較

実験値は前報の図-5 をそのまま用いて図-15に示す。計算値は一点鎖線で記入し、引張ブレースは完全弾塑性の $N-\Delta L$ 関係を、また、圧縮ブレースは図-13のような $N-\Delta L$ 関係をもつと考えると、X型、Kトラスト型、Z型ブレースの $P-\delta$ の関係に換算したものである。なお、RX型で $\lambda=46$, RV型で $\lambda=68$, RZ型で $\lambda=92$ である。

実験値と計算値を比較する。RX型では座屈後の荷重低下の勾配は似ているが、最大荷重を保持する状態が異なる。RV型では初期勾配の違いはあるが、塑性域の挙動はぴったり一致し、片ブレースのRZ型では、ブレースに圧縮力が働く場合は図-13の $\lambda=100$ の傾向と類似し、引張力が働く時には完全弾塑性の曲線よりはむしろ低い耐力となる。繰り返し加力の場合には単純な一方向力の挙動と異なり、歪硬化の影響が残留たわみによって打消され、引張ブレースの耐力も低下したと思われる。

したがって、解析の際に用いた仮定では、引張ブレースの塑性域での耐力を少々高めに考え、また、圧縮ブレースの座屈後の耐力は前節で述べたごとく低めに考えている。そこで、両者の耐力の仮定の誤差が打消し合った状態がPX, RV型の挙動で、塑性域の荷重低下の傾向が一致するという結果が生じたのであろう。ただし歪硬化の無視や線材断面への置換という仮定のために、最大耐力の状況が異なり、この違いは λ の小さいものほど著しい。

3.5. ブレース付きラーメンの解析と実験値との比較

各試験体の $P-\delta$ 曲線と計算値(初期剛性はSTEP解析, B-C-Dは弾塑性解析, Eはブレースの座屈荷重)を示す図-16より両者の比較を行なう。RX型での両者の相違はブレースのみの挙動における差と全く相似である。圧縮ブレースが座屈すると耐力は急激に低下し、その後、ラーメンが働き始め荷重が増加する。ところが、変形がC点まで進むと柱脚に塑性ヒンジが生じ再度、荷重が低下し、最後に梁端にヒンジが生じ(D点)、崩壊機構に達する。実験値には急激な荷重の低下はないが、徐々に低下し、再び上昇するという傾向がみられ、計算値と定性的に一致する。

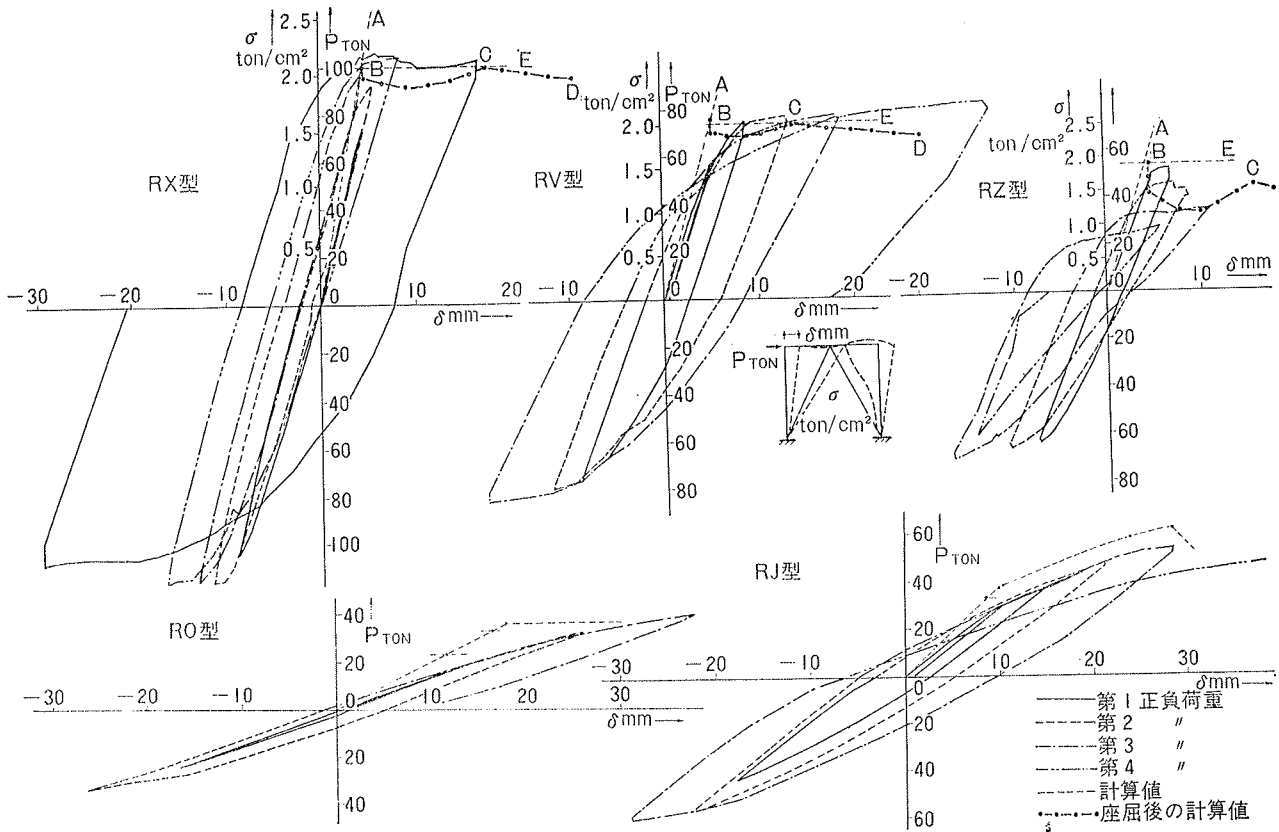


図-16 荷重-変形曲線

RZ型もRX型の実験値と計算値の関係と同じ傾向にあるが、ブレースのλが大きいので、座屈後の面外たわみが多い。ただし、ブレースに引張力が働く状態で繰り返し加力を行ってもラーメンの影響で荷重は上昇している。RV型はRX, RZ型の性状とは異なる。すなわち、ブレースが座屈しても、荷重は徐々に上昇し、解析で崩壊機構に達したと考えられる変形を越えてもなお荷重は増加する。P-δ曲線はBi-linearの関係を示している。この理由として考えられるのは、ブレースがついている梁材の影響である。前報で述べたようにRV型の梁材の上, 下のたわみ量は多く、あたかもブレースの一端が弾性支持されているのと同じ状態にある。したがって、ラーメンが崩壊機構になる順序もRX, RZ型と違い、まず梁中央、次に梁の端部柱脚の一端、他端の順に塑性ヒンジができること、また、圧縮ブレースの座屈も荷重を低下させるほど急激に起こらないことなどの理由でRX型よりすぐれた性状となったのであろう。

全体的にみて、 $\lambda < 100$ の圧縮、引張ブレースをもつラーメンの挙動は弾性剛性 O-A と座屈荷重 E の Elasto-Plastic の関係と考えられる。

3.6. 全体の考察

実験値と計算値の比較によって、ブレースだけとり出した挙動ではλの小さい場合に、また、ブレース付

きラーメンの場合にはRV型に問題はあるが、座屈後の荷重低下の傾向はよく一致することがわかった。

ただし、両者の傾向が一致するのも、引張ブレースの耐力は大きめに、圧縮ブレースは少なめに仮定したことによって、誤差が打消されたためである。また、歪硬化の影響も大きく、解析法にはまだ改良の余地が多分にある。

この実験および解析では圧縮ブレースを有効とした。そこで、細長比別に圧縮ブレースの有効性を検討し、結果を図-17に示す。図には引張ブレースのみ有効とする下限と、引張、圧縮の両ブレースを完全に有効とした上限があり、後者は耐力、剛性とも前者の2倍で

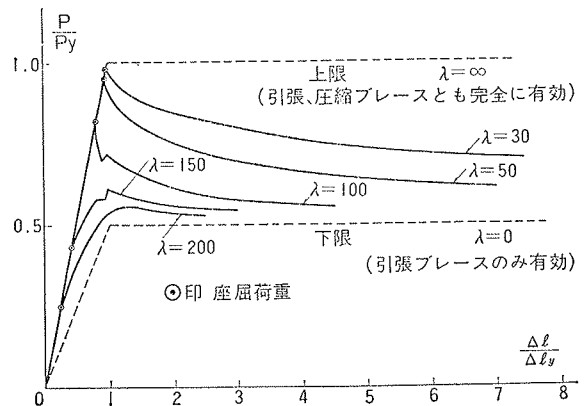


図-17 圧縮ブレースの有効性

ある。図-17から考えると、 λ が大きくなるにつれて耐力は低下し、剛性もかなり低荷重で低下する。すなわち、 $\lambda=150, 200$ では引張ブレスのみの場合に比べ剛性は少々高いが、耐力的には大差ない。また、 $\lambda=30, 50$ では剛性、耐力とも上限に近い。ちょうど、 $\lambda=100$ が中間点で、この値は弾性座屈と塑性座屈の境界細長比に等しい。したがって、 $\lambda < 100$ の時には圧縮ブレスも有効と考えて設計しても良いと思う。ただし、ブレスが局部座屈を起こすと耐力は著しく低下するので注意を要する。

次に、ブレスの履歴性状を第2節から計算したものが図-18である。図中の O-A, O-E は弾性域で3.2.1.1. から求め、A-B, B-C は座屈後の荷重低下の曲線で、弾塑性、完全塑性の状態の図-13に対応する。C-D は除荷と逆載荷の曲線で元たわみ δ_0 をもつ材の引張剛性の低下を考慮した弾性式

$$N = \frac{EA}{1 + \frac{A\delta_0^2}{2I}} \cdot \frac{\Delta l}{l} + C \quad (C: \text{定数})$$

で求めた。なお、この C-D 部分については弾塑性を

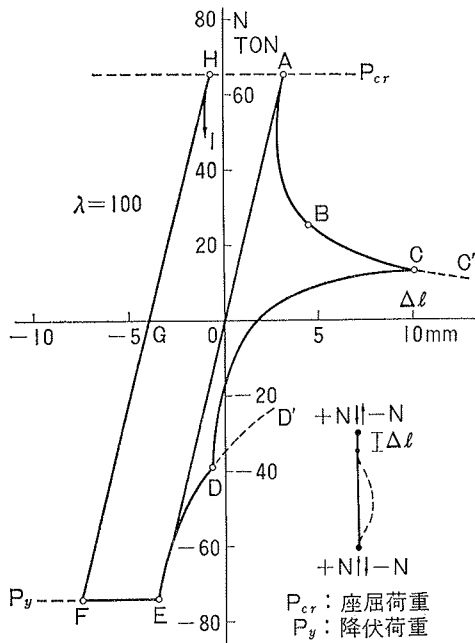


図-18 ブレスの履歴特性

考えて解析中である。D-E は引張によって塑性ヒンジが生じた状態で、E-F は降伏荷重、F-G は除荷曲線である。以後、OABCDEFGGを平行移動して履歴性状と考える。これを動的解析に用いれば良いのであるが、非常に複雑な性状である。この考え方と同様な解析結果を東京工大の藤本教授が発表されているが、まだ、かなりの問題があるようである。ブレス付き構造の履歴性状の解明は今後の課題である。

3.7. まとめ

- イ) 細長比の小さい圧縮ブレスの座屈後の $N-\Delta l$ 曲線は計算値を大幅に上回るが、細長比が大きくなると、座屈後の荷重低下の傾向は一致する。
- ロ) 引張、圧縮の両ブレスで実験値と計算値を比較すると最大荷重を維持する状態が少々異なるが、塑性域の挙動は一致する。
- ハ) ブレス付きラーメンのRV型は実験値と計算値の違いは大きい、RX型、RZ型ではかなり一致する。
- ニ) 実験値と計算値の異なる原因として歪硬化の影響が考えられる。
- ホ) 圧縮ブレスは $\lambda < 100$ であれば十分耐力を発揮し、設計上有効と考えてよい。
- ヘ) ブレスの履歴性状は図-18のごとくであるが、まだかなりの問題が残っている。

参考文献

1. ブレス付き鉄骨ラーメンの実験的研究(その1) 大林組技術研究所報 No. 3 高橋泰彦, 岡田宏
2. 建築学大系 12巻 座屈論
3. 繰り返し水平荷重を受けるラーメンの性状; 学会近畿支部 昭40 若林実, 辻文三
4. 繰り返し荷重を受ける筋違付きラーメンの弾塑性解析; 学会梗概集 昭44 藤本盛久, 松本芳紀, 他
5. 鋼管の座屈と座屈後の挙動; 昭35 東大伸研究室
6. 鋼構造部材の耐力(その1) 学会論文報告集 昭41 加藤勉, 秋山宏, 他