

可変剛性ブレース付骨組の復元力特性

金 夢 潔・中山 昭 夫

EXPERIMENTAL STUDY ON THE RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF "Y-BRACED STEEL FRAME"

By Kiyoshi KANETA and Akio NAKAYAMA

Synopsis

The elasto-plastic behavior of braced frame becomes very complicated on the onfluence of the slender's ratio and the shape of cross section, etc. of bracing members. This is mainly because of the instability of compression member. The braced frame is commonly used as K-braced or X braced frame. In such a case, the restoring force characteristics of the frame largely depend upon the slender's ratio of the braces as following.

- (1) When the slender's ratio of the braces λ is less than 30, the experiment of this braced frame produces the stable hysteretic loops.
- (2) If the braces are relatively light ($\lambda \geq 200$), the braced frame shows the deteriorating hysteretic loops.
- (3) The frame with ordinary braces ($200 > \lambda > 30$) shows the reversed S-shaped hysteretic loops, which is caused by inelastic lengthening of the braces while in tension and by thier buckling when in compression.

These tendencies of the braced frame are caused by the buckling of the braces.

The authors would like to improve the restoring force characteristics by introducing the new brace system, what we call, "Y-braced frame".

The exprimental results and the elasto-plastic behaviors of "Y-braced frame" are described in detail herein.

1. 研究の目的

ブレース付骨組の弾塑性挙動は筋かい材の細長比, 断面形状, 組み方, 接合方法等の影響を受けて複雑な履歴性状を示す。筋かい材は通常 X 形または K 形ブレースとして架構に組み込まれるが, いずれか片方の筋かい材は必ず圧縮力を受けることになり, 圧縮筋かいの不安定現象による材の強度及び剛性の劣化と材の残留変形の影響のため, その履歴性状は一般の門形骨組とは相当異なることになる。この様な筋かい付骨組の一般的性状を既往の研究^{1)~8)} からまとめると次のようになる。

- (1) 筋かい材にアングル等の細長比の大きい部材 ($\lambda > 200$) を用いた場合, 荷重-変形の履歴ループは, いわゆる slip model type の復元力特性を示す。
- (2) 筋かい材に H 型鋼のような細長比の小さい部材 ($\lambda < 30$) を用いた場合は圧縮筋かいの座屈による耐力, 剛性の低下は殆ど生じないため, 復元力特性は比較的安定した紡錘形の Masimg model type の履歴特性を示す。

(3) 中間的な細長比を持つ筋かい材の場合は圧縮筋かいの座屈により履歴ループは逆S字形となり、変位振幅の増大と共に耐力、及び剛性が低下してゆく劣化特性を示す。

これらの結論から、筋かい材はできるだけ細長比の小さい ($\lambda < 30$) 材を使った方が安定した履歴特性を得られることになる。すなわち、細長比が大きくなると圧縮材の座屈による不安定現象の影響を受けて、履歴特性は劣化するため、筋かいを座屈させない方が設計上は望ましい。しかしながら、他方では筋かい材が水平力の一部を負担する結果、柱材には引抜力の問題が生じることになる。一般に筋かいは水平力の抵抗要素として骨組の中に組み込まれるが、筋かい材が水平力を負担することにより柱に引抜力が生じる。それ故、筋かい材の剛性が大きくなると筋かいの水平力分担は大きくなり、柱に過大な引抜力を与えることになって、設計上は好ましくない。結局のところ、筋かいの設計に関しては筋かいを座屈させないように細長比の小さい部材を用い、なおかつ剛性は小さくした方がよいという矛盾した結果が出てくる。このような矛盾を改善するためには、筋かい材を座屈させずに、むしろ他の部材を降伏させて、筋かいには座屈荷重以下の軸力しか作用させない筋かい形式を採用する方が望ましい。このような筋かい形式として、偏心K形ブレース⁹⁾、Y形ブレース¹⁰⁾、Y形を修正した可撓ブレース¹¹⁾、パネルブレース¹²⁾、eccentrically braced frames⁵⁾等の筋かい形式がある。いずれも圧縮ブレースの座屈以前に他の部材の降伏を先行させることにより復元力特性の改善をはかり、地震エネルギーの吸収を大きくしようとするものである。本研究は上記の筋かい形式のうちY形ブレース付骨組の水平繰返し載荷時における弾塑性履歴性状を実験的に研究した結果をまとめたものである。Y形ブレースとは従来のK形ブレースに束材を導入し、この束材の降伏をブレース材の座屈に先行させることにより、復元力特性の適性化をはかったものである。Y形ブレースの特徴はこの束材の断面積及び長さを変えることにより剛性を変化させることが可能であり、実用性は非常に高い。本研究ではこのようなY形ブレース付骨組と従来のK形ブレース付骨組の水平繰返し載荷実験を行い、その弾塑性挙動について比較検討を加えた結果について詳述する。

2. 実験の概要

2.1 試験体

本研究の目的は、前述のように、K形ブレースに束材を導入してY形とした可変剛性ブレース付骨組の復元力特性及び弾塑性性状等を実験的に明らかにすることである。このため試験体は従来のK形ブレース付骨組と束材の剛性を变化させたY形ブレース付骨組の2種類とした。K形ブレースの試験体は全溶接の試験体(Aタイプ試験体)と筋かい材を通常の高力ボルト接合とした試験体(Fタイプ試験体)の2体であ

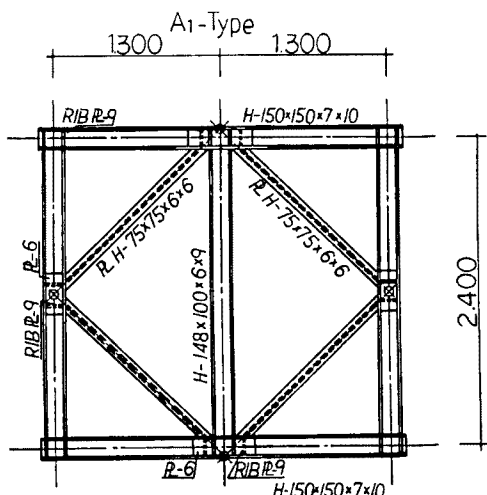


Fig. 1. A-type test specimen

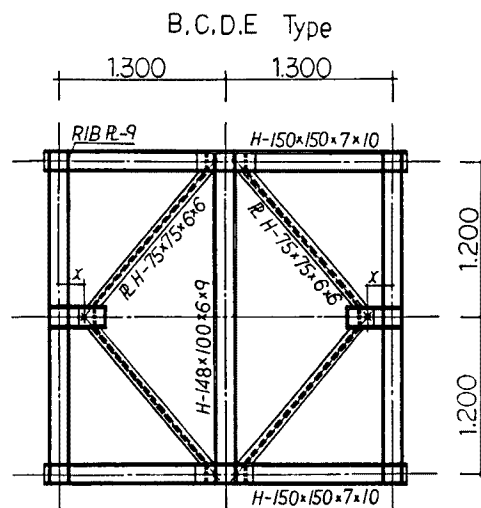


Fig. 2. B~E-type test specimen

る。Y 形ブレースの試験体は束材の長さ及び断面を変えた 4 体の試験体 (B, C, D, E 試験体) とした。試験体は実物の約 1/3 のスケールを想定して、その形状、寸法は Figs. 1~3 に示す。Fig. 1 は通常の K 形ブレース, Fig. 2 は Y 形ブレース, Fig. 3 はラーメンとブレースはガセットプレート (Plate-6) を介した高力ボルト (M-16, F 11 T) 接合である。試験体は加力装置の都合上, 2 層 1 スパン対称ラーメンとなっていて, 水平部材が柱, 鉛直部材が梁部材となっている。部材断面を Table 1 の部材リストに示すが, 柱は H-150×150×7×11, 梁は H-148×100×6×9, 筋かい H-75×75×6×6 (built up) で総ての試験体に共通である。Y 形ブレースの試験体は束材の長さを 20 cm 及び 40 cm, 束材の断面を梁と同一としたもの, H-210×100×6×9 (built up) の合計 4 体である。鋼材は総て JIS, SS 41 材で素材試験の結果を Table 2 に, また応力-ひずみ曲線の代表例を Fig. 4 に示す。

2.2 実験方法

(1) 載荷

載荷には京都大学工学部建築系教室構造実験室に設置されている容量 300 ton の長柱試験機を用い, Fig. 5 に示すように試験体をセットして正負の繰り返し載荷を行った。負載荷時には Fig. 5 に示すピンとローラー金物を反対位置にセットし直して逆方向載荷を行った。載荷方法は次の順序とした。まず最初の正載荷では弾性域内にとどめ, 次に降伏荷重をある程度越えたところで除荷し, 負載荷を行う。この場合, 荷重振幅は前の正載荷より少し増加させ, 適当に荷重振幅を漸増させながら第 3 サイクルの最終状態まで繰り返し載荷を行った。

(2) 測定

変位の測定は Fig. 6 に示すように, 1/100 mm ダイアルゲージをセットして各点の変位を計測した。A 及び F タイプの試験体は筋かいの座屈検定のため, 筋かい中央部の面内直交方向変位も計測した。

2.3 実験結果

(1) A タイプ (K 形ブレース) 試験体

K 形ブレース付の A タイプ試験体の中央部における鉛直変位と荷重との実験結果を Fig. 7 に示す。荷重-変位曲線に示されるように, 最初の正載荷時には 60 ton 前後まではほぼ直線性を保ち弾性域と考えられるが, 以後少しずつ剛性が減少する。この原因は部材端部における局所的な降伏現象だと思われる。すなわち, Fig. 8 の荷重-ひずみ曲線に示されるように, 梁端部においては 60 ton 前後から降伏が生じ, 以後ひずみの増大が著しい。また, 梁他部のひずみ履歴を Fig. 9 に示すが, 正載荷時にはこの点のひずみは引張りとなり, 100 ton 程度まで直線性を示す。しかしながら, 負載荷時には圧縮となり, 梁軸力の影響を受け 50 ton 前後で降伏を生じる。最初の正載荷時には 115 ton 程度まで載荷を行い, 部材の一部が弾性域に入った時点で載荷をやめて除荷したが, この時点ではブレースの座屈は生じていない。しかし, 次の負載荷時において 130 ton で片側のブレースが座屈し始め, 135 ton の最高荷重から急激に耐力が減少し, その間ダイアルゲージの測定は不可能であった。(Fig. 7 の点線部分) この時の座屈したブレースに貼付したゲージの測定結果を Fig. 10 に示すが, 120 ton 程度から急激にひずみが増加し, 圧縮及び引張りひずみが増大している。もう一方のブレースは座屈減少は見られなかったが, Fig. 11 に示すひずみ履歴からもこのブレースは若干塑性域に入っているに過ぎない。1 サイクル目の負載荷時に圧縮ブレースの座屈が生じた後, 除荷して第 2 サイクルの正載荷を行った。この正載荷時には上側のブレース座屈まで載荷する予定であったが,

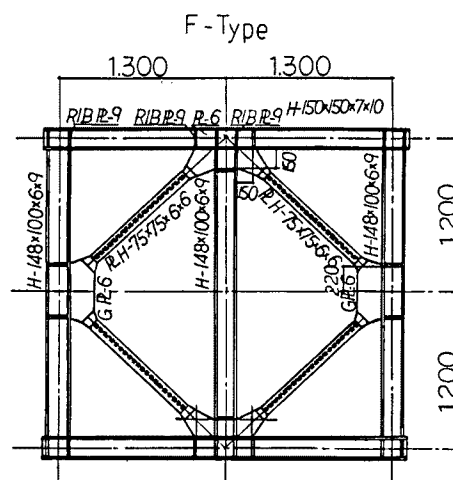


Fig. 3. F-type test specimen

Table 1. List of steel members

Specimen	Member	X (mm)	Used Steel Shapes
A	Column		H-150×150×7×10
	Beam		H-148×100×6×9
	Brace		H- 75× 75×6×6 (built up)
B	Column		H-150×150×7×10
	Beam		H-148×100×6×9
	Brace		H- 75× 75×6×6 (built up)
	Strut	200	H-148×100×6×9
C	Column		H-150×150×7×10
	Beam		H-148×100×6×9
	Brace		H- 75× 75×6×6 (built up)
	Strut	400	H-148×100×6×9
D	Column		H-150×150×7×10
	Beam		H-148×100×6×9
	Brace		H- 75× 75×6×6 (built up)
	Strut	200	H-210×100×6×9 (built up)
E	Column		H-150×150×7×10
	Beam		H-148×100×6×9
	Brace		H- 75× 75×6×6 (built up)
	Strut	400	H-210×100×6×9 (built up)
F	Column		H-150×150×7×10
	Beam		H-148×100×6×9
	Brace		H- 75× 75×6×6

Table 2. Mechanical properties of materials

	Yield Stress (kg/mm ²)	Ultimate Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
Flange (H-148/100)	27.5	43.5	25.6
Flange (H-150/150)	25.0	42.9	29.3
Plate-9	27.9	44.0	28.5
Plate-6	35.6	51.8	27.3

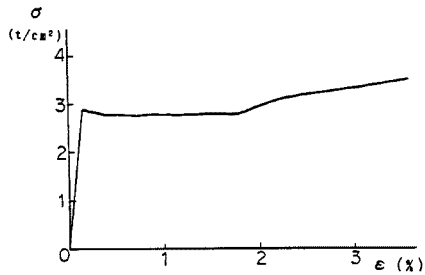


Fig. 4. Stress-strain curve of steel

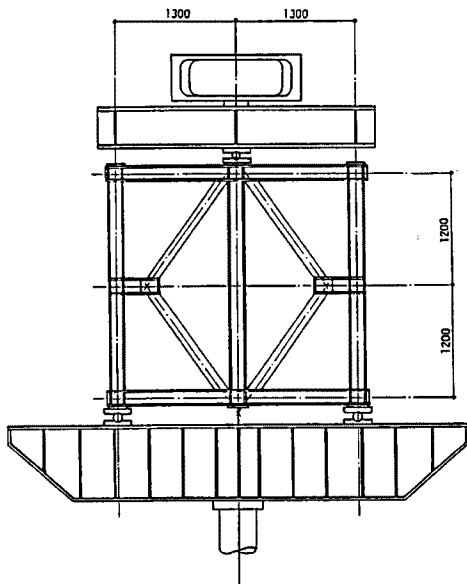


Fig. 5. Loading apparatus

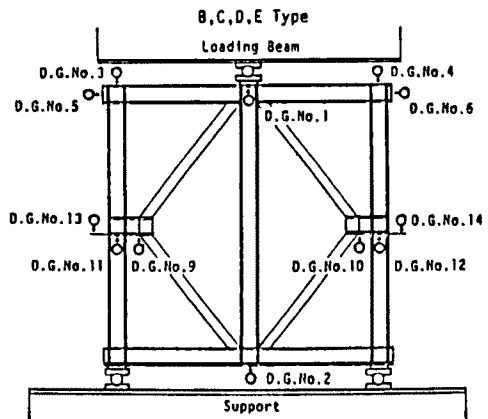
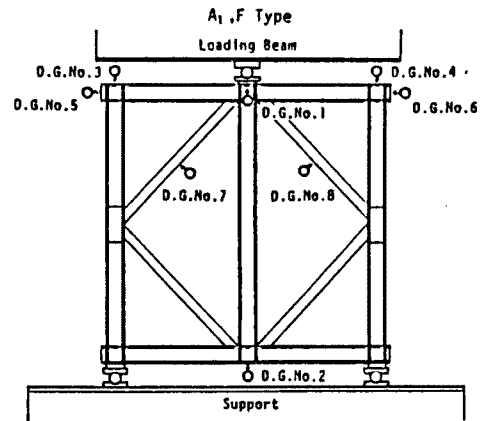


Fig. 6. Measuring configuration

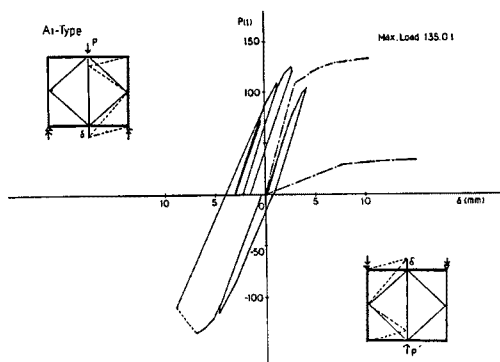


Fig. 7. Load-deflection curve of A-type specimen

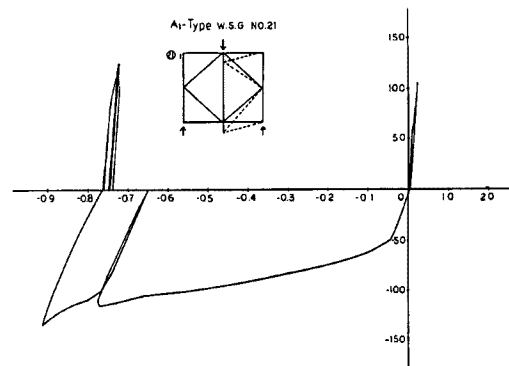


Fig. 8. Load-strain curve (A-type specimen)

125 ton で中央の梁が面外に座屈を生じ、これ以上载荷を行うことが困難になったので、この時点で実験を終了した。最大耐力は結局圧縮ブレースの座屈によって決定され、負荷時の 135 ton が最大荷重であったが、K 形ブレース付骨組に特有の逆 S 字ループは表れていない。

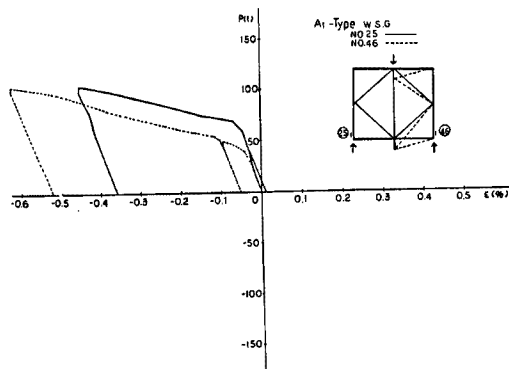


Fig. 9. Load-strain curve (A-type specimen)

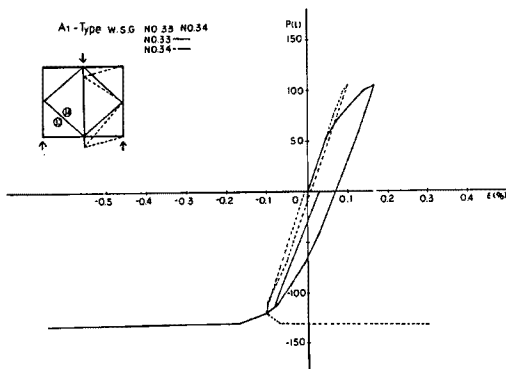


Fig. 10. Load-strain curve (A-type specimen)

(2) B タイプ (Y 形ブレース) 試験体

B タイプ試験体は束材に梁と同断面の H 形鋼を用い、束の長さを 20 cm とした Y 形ブレース試験体であるが、この試験体の荷重と鉛直方向変位に関する実験結果を Fig. 12 に示す。K 形ブレースの A タイプ試験体と比較して、理想的な紡錘形のループを示している。この試験体は束材の降伏により 35 ton 程度で剛性が低下して、最初の正載荷 60 ton で束材の塑性化はかなり進行した。このことは Fig. 13 に示すように、束材に貼付したワイヤーストレインゲージの測定結果からも確認された。1 回目の正載荷は 60 ton まで行い、除荷の後逆載荷を行ったが、逆載荷は 80 ton までで打ち切った。その後正載荷を行ったが、耐力はそれほど上昇せず、塑性変形が進行して結局 110 ton で最大耐力となり、それ以上荷重は増加しなかった。この間、ブレースの座屈は生ぜず、ブレースのひずみ履歴を Fig. 14 に示すが、ほぼ弾性域にとどまっている。また、束材と梁との接合部のパネルゾーンの変形はそれ程生じていない。Fig. 15 にパネルゾーン内に貼付したロゼットゲージ (45° 方向) の測定結果を示すが、0.1% 程度のひずみ量で変形は小さい。この試験体の実験終了後の写真を Photos. 1~2 に示す。束材のせん断変形が卓越しているのが分かる。結局、この試験体は 1 サイクル半の載荷しかできなかったが、復元力特性は理想的な紡錘形の履歴特性を示し、良好な結果が得られた。

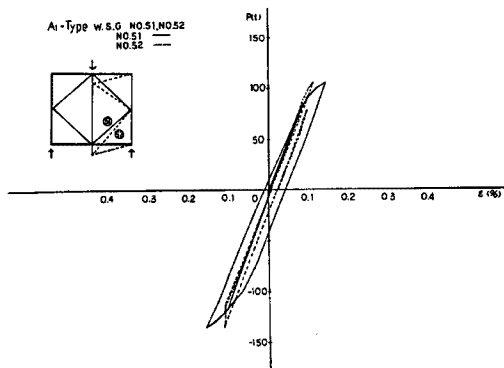


Fig. 11. Load-strain curve (A-type specimen)

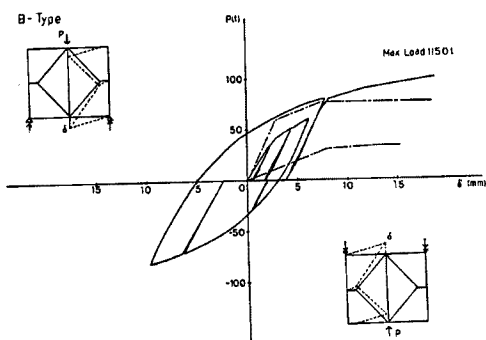


Fig. 12. Load-deflection curve of B-type specimen

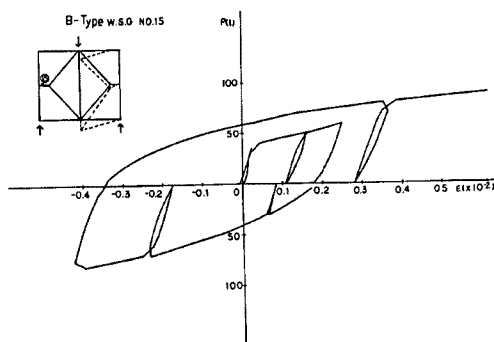


Fig. 13. Load-strain curve (B-type specimen)

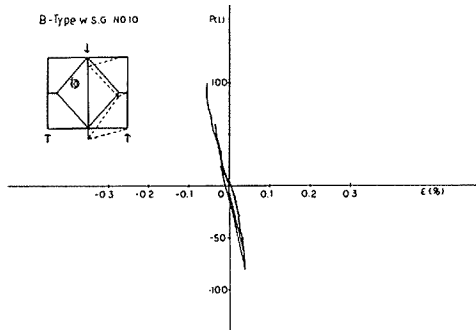


Fig. 14. Load-strain curve (B-type specimen)

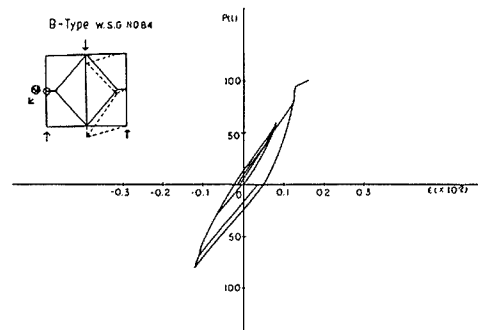


Fig. 15. Load-strain curve (B-type specimen)

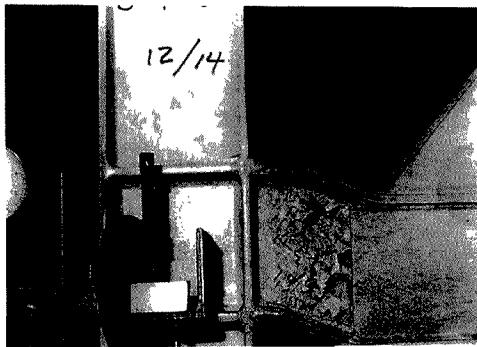


Photo. 1. Shear deformation of Y-brace (B-type specimen)

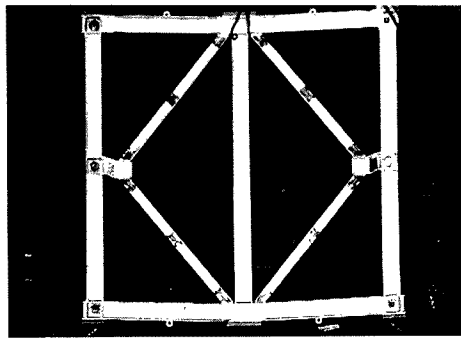


Photo. 2. Plastic deformation of B-type specimen after repeated loading

(3) C タイプ (Y 形ブレース) 試験体

C タイプ試験体は B タイプと同様、束材は梁と同断面の H 形鋼を使用した Y 形ブレース付骨組であるが、束材の長さを B タイプの 2 倍の 40 cm とした試験体である。この試験体の荷重—鉛直変位の実験結果を Fig. 16 に図示する。B タイプ試験体と同様の紡錘形の履歴ループを描くが、B タイプより剛性、耐力共小さい。すなわち、この試験体の場合、束材の剛性が B タイプの半分であり、降伏も 30 ton 前後から始まり、最大耐力 94.5 ton と小さくなっている。また、第 2 サイクルの载荷と第 3 サイクルの载荷との間に耐力の上昇がほとんど見受けられない。Figs. 17~18 に C タイプ試験体の束材及びパネルゾーンのひずみ履歴を示すが、束材のひずみは Fig. 17 に示されるように B タイプに比較して、かなり大きな塑性ひずみが現れている。Fig. 18 はパネルゾーン内の 45° 方向のひずみ履歴であるが、パネルゾーンの塑性化が早期に現れている。主ひずみはほぼ 45° 方向であり、せん断変形が卓越している。この試験体は束材が長く曲げ変形型であり、そのためパネルゾーンは大きなせん断変形を受けることになる。結局、この試験体は第 3 サイクルの正载荷時に梁材の構面外座屈により耐力が決定され、最大耐力は 94.5 ton であった。実験終了後の試験体の状況を Photos. 3~4 に示すが、束材は曲げ変形を生じ、パネルゾーンのせん断変形が著しい。

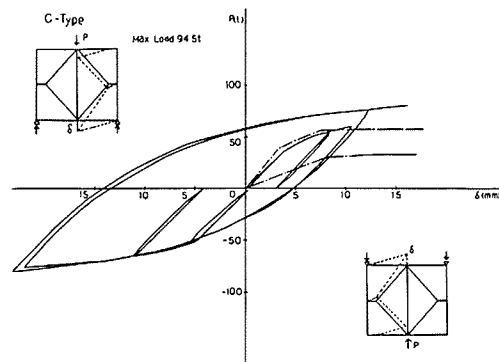


Fig. 16. Load-deflection curve of C-type specimen

(4) D タイプ (Y 形ブレース) 試験体

D タイプ試験体は束材を H-210×100×6×9

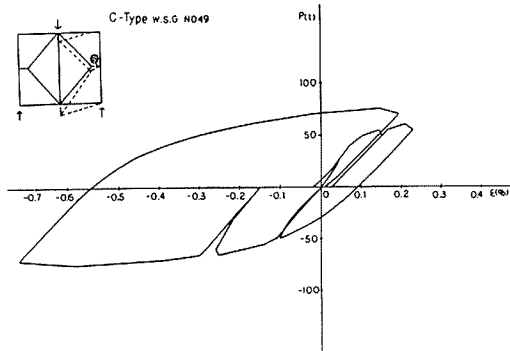


Fig. 17. Load-strain curve (C-type specimen)

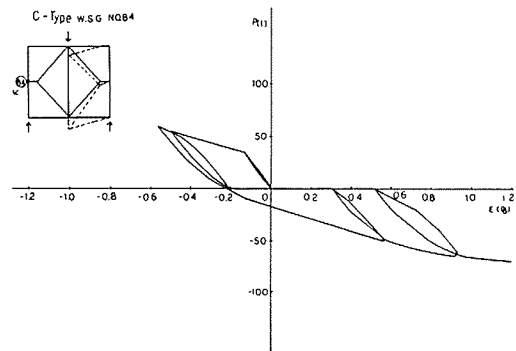


Fig. 18. Load-strain curve (C-type specimen)

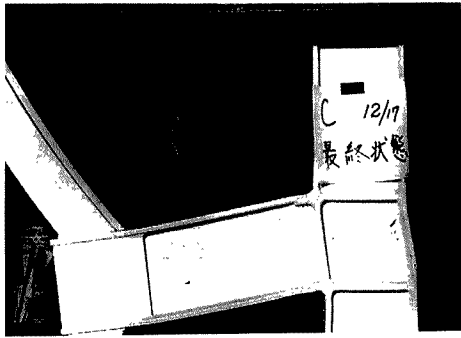


Photo. 3. Shear deformation of panel-zone (C-type specimen)

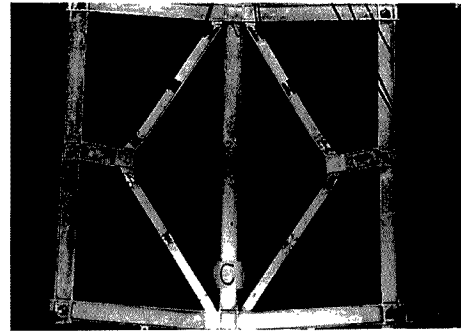


Photo. 4. Plastic deformation of C-type specimen after repeated loading

(built up) を用い、束材の長さを B タイプと同様 20 cm とした Y 形ブレース付骨組である。この試験体の荷重-鉛直変位曲線の実験結果を Fig. 19 に示す。B タイプとはほぼ同様の実験結果を示すが、剛性はかなり高くなっている。まず最初の正載荷では 50 ton 前後で束材が降伏を始める。80 ton ではほぼ全体が塑性化し、この時点で除荷して逆載荷を行い、更に第 2 サイクルの載荷を行った後最大耐力まで載荷した。D タイプの場合、最大荷重は中央の梁の面外座屈により決定され、耐力は 125 ton であった。D タイプの場合、束材の剛性が大きく、束材のせん断変形の影響が大きいと思われるため、束材のウェブ部分にロゼット型のワイヤーストレンゲージを貼付しているが、このゲージの 45° 方向のひずみ履歴を Fig. 20 に示す。50 ton を越

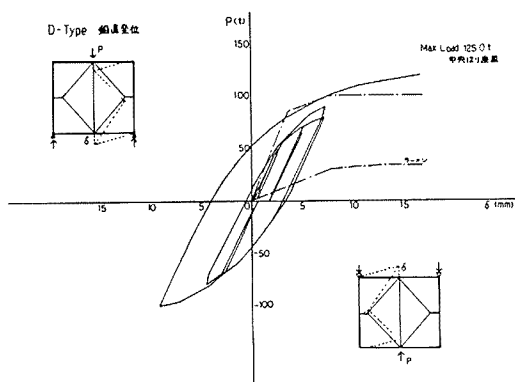


Fig. 19. Load-deflection curve of D-type specimen

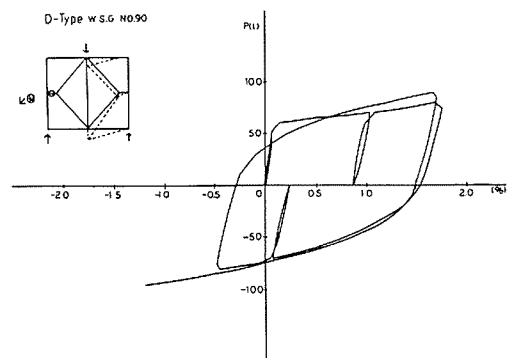


Fig. 20. Load-strain curve (D-type specimen)

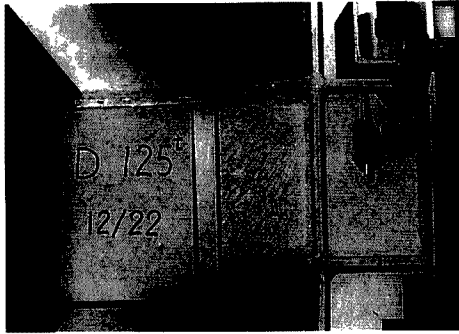


Photo. 5. Shear deformation of Y-brace (D-type specimen)

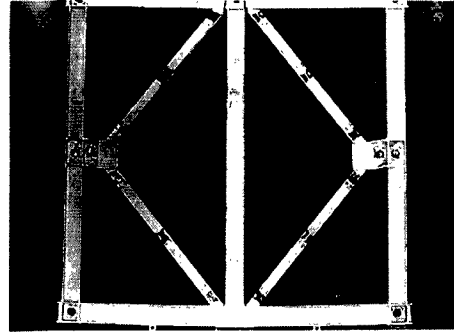


Photo. 6. Plastic deformation of D-type specimen after repeated loading

えたあたりから降伏が始まり、60 ton で完全に降伏して、荷重－変位曲線の結果とよく一致している。実験終了後の試験体の状況を **Photos. 5～6** に示すが、束材のせん断変形が顕著であり、パネルゾーンの変形は小さい。

(5) E タイプ (Y 形ブレース) 試験体

E タイプ試験体は D タイプと同様、束材に H-210×100×6×9 (built up) を用い、束材の長さは C タイプ同様 40 cm とした Y 形ブレース付骨組である。この試験体の荷重－鉛直変位の実験結果を **Fig. 21** に示すが、束材の剛性が、D タイプより小さいため、剛性も全体的に若干低い傾向となっている。降伏は 40 ton 程度から始まり、70 ton で正載荷をやめて逆載荷を行った。逆載荷の場合、束材の塑性化のため耐力はさほど上昇せず、変形の増大が顕著であった。更に、第 2 サイクルの載荷においても変形の増大の割には耐力はあまり上昇せず、最終サイクルの載荷を行い、片側梁の座屈により耐力は決定され、最大耐力は 150 ton であった。束材と梁とのパネルゾーンに貼付したロゼットゲージの 45° 方向のひずみ履歴を **Fig. 22** に示す。この試験体の束材の変形の写真を **Photos. 7～8** に示すが、D タイプと比較して束材は曲げ変形の影響が大きく、また、そのため束材の接合部パネルゾーンはかなり大きなせん断変形を生じている。

(6) F タイプ (K 形ブレース) 試験体

F タイプ試験体は A タイプと同様、K 形ブレース付骨組であるが、この試験体はブレースとラーメンの接合のためガセットプレートを介して高力ボルト接合を用いている点が異なっている。この試験体の荷重－鉛直変位の実験結果を **Fig. 23** に示す。A タイプと同様、この試験体も 60 ton 前後までは直線性を示し、その後少しずつ剛性が低下している。逆載荷時もほぼ同様な傾向を示すが、第 2 サイクルの正載荷時に

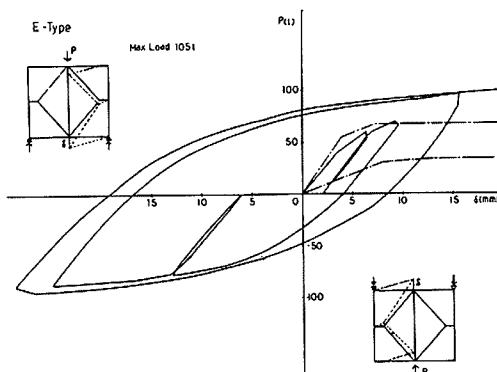


Fig. 21. Load-deflection curve of E-type specimen

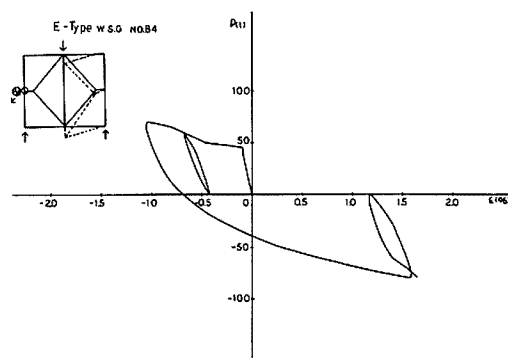


Fig. 22. Load-strain curve (E-type specimen)



Photo. 7. Shear deformation of panel-zone (E-type specimen)

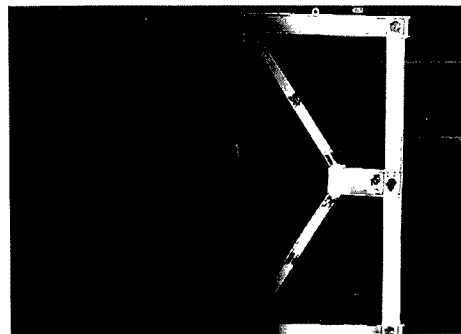


Photo. 8. Plastic deformation of E-type specimen after repeated loading

て 130 ton 近くの荷重域で突然大きな音と共に高力ボルトの滑りが生じ、荷重が急減した。このボルトの滑りによる残留変形は、最初はそれ程大きいものではなかったが、その後他のボルトの滑りが生じるにつれてだんだん大きくなっていった。これらのボルトの滑りはほぼ 120 ton 前後の荷重域で生じた。この試験体の場合、ブレースの座屈以前に中央梁の構面外座屈が生じ、結局最大耐力は 132.5 ton であった。

3. 考 察

解析は通常のマトリックス法を用い、材料の応力ひずみの関係を完全弾塑性と仮定する。また、軸力と曲げの interaction は考慮せず、単調載荷時のみを考える。いわゆる通常の hinge method である。材料の降伏応力は素材試験の平均値として $\sigma_y = 2.85 \text{ ton/cm}^2$ を用い、ヤング係数は $E = 2.1 \times 10^3 \text{ ton/cm}^2$ とする。以上の仮定のもとに解析を行い、各タイプ試験体の弾性解を図示したものが Figs. 24~28 である。この場合、束材は曲げ変形より、せん断変形が大きいので、束材せん断変形量の評価はウェブのみを考慮し、形状係数

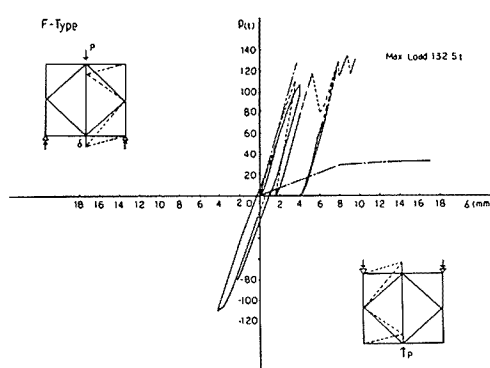


Fig. 23. Load-deflection curve of F-type specimen

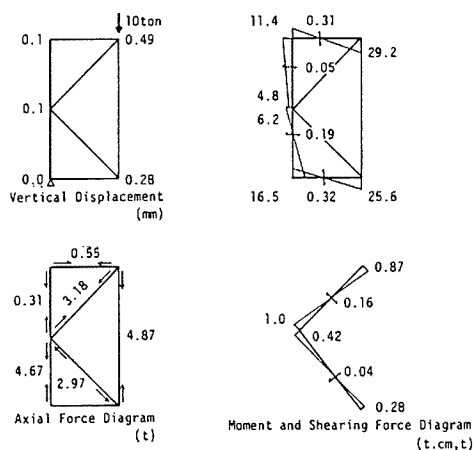


Fig. 24. Calculated results of A & F-type specimen

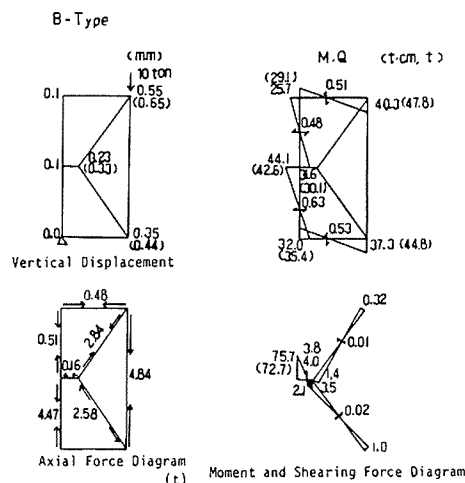


Fig. 25. Calculated results of B-type specimen

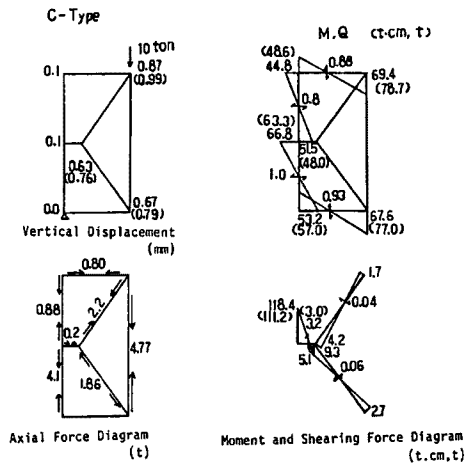


Fig. 26. Calculated results of C-type specimens

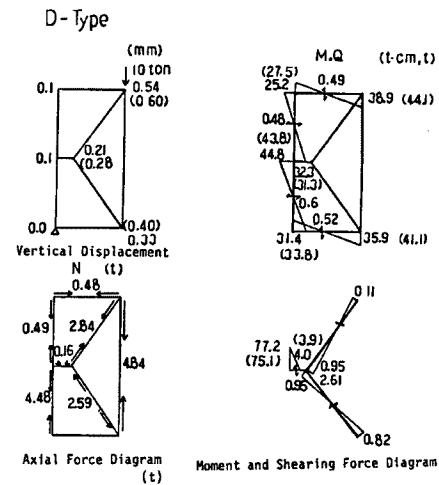


Fig. 27. Calculated results of D-type specimens

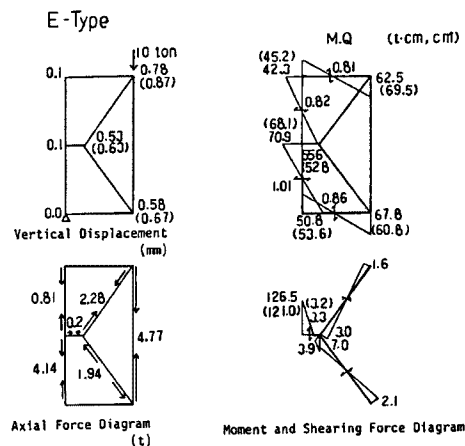


Fig. 28. Calculated results of E-type specimens

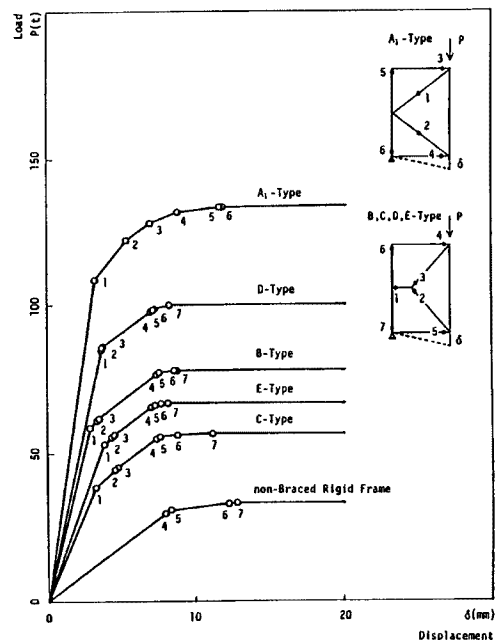


Fig. 29. Analysed load-deflection curve of each specimen

$\alpha = 1.0$ とした。また、**Fig. 29**は前述の hinge methodによる解析結果を荷重-鉛直変位の関係として図示したものである。束材に関しては曲げ降伏が支配的であると考え、せん断降伏は考慮していない。ま

た、ここで採用している初期剛性は、束材のせん断変形を考慮した解析結果である。なお、参考のためにブレースの無い純ラーメンの解析値を図中に示す。図中の黒丸は降伏する節点の順序を示している。この解析結果を各試験体の荷重-鉛直変位の実験結果に一点鎖線で図示する。実験値と解析値は良好な一致を示していることが明かである。ただし、ここでは繰り返し載荷は考えず、またひずみ硬化等の影響は考慮していないため、繰り返し載荷による耐力の上昇については言及しない。この実験結果と解析結果を比較すると、束材の短いBタイプ及びDタイプの剛性低下が解析値よりかなり早期に現れ、解析値の方が高い耐力を示す。一方束材の長いCタイプ及びEタイプの場合には解析値と実験値は最初の載荷サイクルでは良い近似値を与えている。この理由は主に束材の降伏パターンの違いによるものと考えられる。すなわち、Bタイプ

及び D タイプの場合、束材が短く、せん断力の影響が大きい。B タイプ及び D タイプの試験体の写真 (Photo. 1 及び Photo. 5) に示されるように、束材が短い場合はせん断変形が支配的である。解析値は総て曲げ降伏を仮定しているため、解析値の方が降伏荷重が高くなる。参考までに束材のせん断力を加えた降伏荷重を求めてみる。降伏条件は von Mises のせん断ひずみエネルギー説を用いる。せん断力はウェブのみ有効とし、分布は一樣と仮定する。部材の降伏応力は前述の $\sigma_y = 2.85 \text{ ton/cm}^2$ を用いると、B~E の各タイプの降伏荷重は次のようになる。

B タイプ; $P_y = 38.4 \text{ ton}$

C タイプ; $P_y = 48.7 \text{ ton}$

D タイプ; $P_y = 53.1 \text{ ton}$

E タイプ; $P_y = 64.8 \text{ ton}$

この降伏荷重は束材のウェブが純せん断で降伏する荷重を示す。束材の長い C タイプ及び E タイプは曲げ降伏荷重を上回っているが、束材の短い B タイプ及び D タイプでは実際の降伏荷重に近くなる。

次に、束材と梁の接合部パネルの降伏を考える。実験結果からも明らかに、このパネルゾーンの降伏も骨組の挙動に与える影響は大きい。特に、束材の長い C タイプ及び E タイプの試験体はパネルゾーンの降伏が早期に現れている。パネルゾーンの降伏荷重は同様に von Mises の降伏条件を用いる。パネルゾーンにかかるせん断力は曲げモーメントを梁せいで割って偶力とし次のようにする。

$$Q_p = M_t / 2\mu h - Q_B \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 M_t ; パネルとの境界での束材の曲げモーメント

Q_B ; 束材のせん断力

$2\mu h$; 梁せい

パネルゾーン内でのせん断力の分布は一樣であると仮定して降伏荷重を求めると、各タイプの試験体について、次のような結果が得られる。

B タイプ; $P_y = 59.4 \text{ ton}$

C タイプ; $P_y = 28.6 \text{ ton}$

D タイプ; $P_y = 136.6 \text{ ton}$

E タイプ; $P_y = 45.1 \text{ ton}$

すなわち、C タイプ及び E タイプのパネルゾーンの降伏荷重は束材の曲げ降伏より先行することになる。ここで、実験結果のひずみ履歴から束材とパネルゾーンの降伏を考えてみる。B タイプの場合、束材とパネルゾーンの荷重-ひずみ曲線 (Fig. 13 及び Fig. 15) を参照して、束材は 30 ton 前後で降伏が始まり、40 ton 程度で塑性化しているが、パネルゾーンは 60 ton 程度で降伏している。すなわち、束材のせん断降伏が先行する。同様に D タイプでも束材の降伏が先行し (Fig. 20) 50 ton 程度で降伏する。これに反して、束材の長い C タイプ及び E タイプ (Fig. 18 及び Fig. 22) では、各々 35 ton 及び 45 ton 程度でパネルゾーンがせん断降伏している。この実験結果からも明らかのように、束材の短い B タイプ及び D タイプ試験体の場合は束材のせん断降伏が先行し、束材の長い C タイプ及び E タイプ試験体は束材と梁との接合部パネルゾーンの降伏が先行する。このことは解析結果とも一致し、また降伏荷重も同程度である。最初の解析では束材の曲げ降伏を仮定したため、降伏荷重が高くなる傾向を示したが、上記のように束材とパネルゾーンの降伏を考えることにより解析値は実際の降伏荷重とほぼ等しくなる。これらの実験結果及び解析より Y 形ブレースの降伏パターンは束材の長さによって変わってくるものと考えられる。すなわち、束材が短い場合は束材のせん断降伏に支配され、束材が長い場合は束材と梁の接合部パネルの降伏によりその挙動が支配される。この時点で剛性が低下し、ラーメン架構の剛性が関与し始めるため耐力が上昇して、その後ラーメンの降伏により最大耐力に達する。以上が Y 型ブレース付骨組の挙動であるが、その挙動は解析値として示した tri-linear 曲線により近似され则认为てよい。また、最後の F タイプ試験体は A タイプと同じ部材で

あるので A タイプと同じ解析値を用いた。

4. 結 論

以上のような実験結果及び解析結果を要約して、K 形及び Y 形ブレース付骨組に関して次のような結論が導かれる。

(1) K 形ブレース付骨組は剛性及び耐力とも大きいが、圧縮ブレースの座屈による急激な耐力減少を伴う不安定現象を示し、耐震設計上は問題が多い。また、その復元力特性の定式化も困難さを伴う。

(2) Y 形ブレースの試験体の場合は圧縮ブレースの座屈は認められず、その履歴特性は安定した紡錘形の履歴ループを示す。Y 形ブレースの降伏は束材及びその接合部パネルゾーンに生じ、降伏後はブレースの軸力はほとんど増加せず、また試験体の剛性はラーメンの剛性とほぼ等しい。従って、Y 形ブレース付骨組の復元力特性のモデル化にあたっては解析で示した tri-linear のモデルが非常によい近似をあたえることになる。

(3) 全体の架構の中で先ず束材に応力が集中し、この部分のせん断力及び曲げモーメントとも他の部材より値が大きいので、Y 形ブレース付骨組の初期剛性の評価には束材のせん断変形を考慮する必要がある。特に、束材が長くなると束材と梁との接合部パネルのせん断変形の影響が大きくなる。降伏もこの部分が先行するため実用のためにはこのパネルゾーンの補強を行い、剛に近づける必要があろう。

以上のように K 形ブレース及び Y 形ブレース付骨組に関する結果をまとめてみたが、K 形ブレースの利点は剛性が高いことにあるものの、その反面、圧縮ブレースの座屈による不安定現象を伴い、圧縮ブレース座屈後は耐力が減少するため、実用性では問題が残る。これに対して、Y 形ブレースの場合は、束材の剛性を変えることにより骨組全体の剛性を変えることが可能で、その履歴ループは理想的な紡錘型を示し、またその復元力特性は tri-linear で近似され、このブレース形式の実用性は非常に高い。この場合、束材は短い方が束材と梁との接合部パネルのせん断変形が小さく、より実用的である。束材を長くする場合は上記接合部パネルに何らかの補強を行う必要がある。

謝 辞

この研究を行うにあたり、(株)竹中工務店の久徳敏治氏を始め同社の方々の協力を頂いた。ここに記して感謝の意を捧げます。

参 考 文 献

- 1) 若林実・松井千秋・三谷勲：「骨組の弾塑性安定及び復元力に関する実験」，日本鋼構造協会機関紙 JSSC, Vol. 6, No. 55, 昭和45年7月, pp. 40.
- 2) 山田稔・辻文三・武田和久：「繰り返し荷重を受ける鉄骨筋違骨組の弾塑性変形性状に関する研究 (I), (II)」，日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和45年9月, pp. 893, 昭和46年11月, pp. 391.
- 3) 藤本盛久・橋本篤秀・北後寿，他：「繰り返し水平荷重を受ける筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性性状に関する研究 (その1), (その2), (その4), (その8), (その10)」，日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和46年11月, pp. 395, 昭和47年10月, pp. 1373, 昭和48年10月, pp. 1053, 昭和49年10月, pp. 971.
- 4) 重信恒雄・田中尚：「繰り返し荷重を受ける筋違構造の復元力履歴モデル」，第22回構造工学シンポジウム, 1976年1月.
- 5) Roeder, C. W., Popov, E. P., "Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes", Proc. of ASCE, Vol. 104, ST3, Mar., 1978, pp. 391.
- 6) Maison, B., Popov, E. P., "Cyclic Response Prediction for Braced Steel Frames", Proc. of ASCE, Vol. 106, ST7, July, 1980, pp. 1401.
- 7) 五十嵐定義・井上一朗：「筋違付架構の研究の覚書」，カラム, 46号, 昭和48年1月, pp. 24.

- 8) 日本建築学会構造標準委員会鋼構造分科会：「筋違付骨組の弾塑性挙動について」，日本建築学会論文報告集，243号，昭和51年5月，pp. 63.
- 9) 藤本盛久・青柳司・鶏飼邦夫，他：「偏心K型ブレース架構の特性に関する研究」，日本建築学会論文報告集，195号，昭和47年5月，pp. 39.
- 10) 瀬川輝夫・久徳敏治・中山昭夫・金多潔：「Y型ブレースの力学的性状に関する研究（その2）」，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和47年10月，pp. 1393.
- 11) 坪井善勝・末永保美・永見一夫，他：「可撓ブレースを有する高層鉄骨フレームの力学的挙動に関する研究（その1），（その3）」，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和48年10月，p. 1047，昭和49年10月，pp. 975.
- 12) 堀井昌博，谷研一，和田章，他：「パネルブレースの水平加力実験（その1）（その2）」，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和49年10月，pp. 985.