

## 鉄骨骨組隅角部の安定性に関する実験

—多雪地域における学校体育館を対象として—

小 野 徹 郎

建 築 学 科

(1980年9月6日受理)

## The Experimental Study of the Stability of Corner Knee Members of Steel Frames

Tetsuro Ono

Department of Architecture

(Received September 6, 1980)

This paper is the experimental analysis for the safety of large span portal steel frames in the heavy snow area. Generally, the portal frames carry vertical load, for instance of dead and snow load on the roof and horizontal load, for instance of earthquake, and wind load. The bending moment of the main members grow bigger at corner crossed beam and column. Therefore, the stability of frames depend on the bearing strength and deformation capacity of the corner knee members.

The objects of this experiment are to explain the buckling strength and deformation capacity of corner knee members, considering the effects of bracing members (for instance of purins and furring strips), and to show the more safety design methods of corner knee member of portal frames.

## 1 序

多雪地域における学校体育館を対象とした大スパン構造物の安全性検討に関連して行った鉄骨骨組隅角部に関する実験を中心に報告するものである。

学校体育館で代表されるような構造物は、通常平家建でスパンが大きく、当然どのようにして屋根を架けるかが設計の主眼となる。大スパンの屋根を架ける場合には、山形或はアーチ状の平面架構を並列し、それらを適当に繋いで骨組を構成する方法のほかに、立体骨組による構成方法がある。ここで対象とするのは最も多く見受けられる山形の平面架構を並列する形式で、単一部材による山形ラーメンのほか、組立部材を用いたトラス構造の骨組である。これら骨組では固定、積載荷重、雪荷重などの鉛直荷重や、地震、風荷重等の水平荷重により、隅角部に大きな曲げ応力が生じ、その隅角部の耐力、変形能力が骨組全体の安定性を左右することになる。実際に、学校体育館、鉄骨プレハブフレーム、トラスフレー

ムなどで隅角部を含む架構の構面外座屈による破壊とみられる例が度々報告されている。

通常、構造物の構造設計を行う場合、梁、柱というように各部材単位でその安全性を検討するが、これは設計、施工上、部材の接合位置で十分面外への座屈変形を押えるように支持されることを前提としたものである。然し構造物によっては骨組隅角部で十分拘束されていなかったりすることがある。また実際の設計では隅角部を含め、梁、柱部材共、外弦材は桁行方向の繋ぎ材である母屋、胴縁或は隅角部の頂点を通る桁梁などで支持されるが、それらは通常フレームの外側のフランジ乃至は外弦材に対して取付き、内側のフランジ、内弦材には何らの横支承材も入らない場合が多い。にも拘らず、鉛直荷重等の外力による曲げ応力は内弦材に対して圧縮となり、隅角部内側の頂点が横方向へ飛び出して座屈することが考えられ、その安定性には問題がある。特にトラス部材のように構面内曲げ剛性に比して構面外への横剛性の小さい部材ではウェブ材の剛性との関連も含めてその塑性挙動は不明確である。

そこでここでは実際に設計されるような形鋼で代表される充腹材と非充腹材であるトラス組立材によって構成される鉄骨骨組の隅角部を取出し、母屋、桁梁等の補剛効果を含め実験を行い、耐力、変形能力の点から考察し、より安全な隅角部の設計に対する方向を見出そうとするものである。

2. 鉄骨骨組隅角部の耐力実験

2.1 実験概要

実験はより実際的な形態で行うことを目標とする。従って実験を計画するに当たり、建築学会学校建築安全性検討第5小委員会、昭和50年度に行った学校体育館の構造形式についての調査結果を基本として標準的な構造形式とその規模を設定し、それに対応して実験を計画した。調査結果を構造形式、スパン長、梁せい、屋根勾配についてまとめたのが Table 1 である。構造形式の85%以上が山形ラーメン、柱脚ピンで、構造体を形成する部材は組立材、H形鋼はほぼ同じ程度であった。骨組スパンは20m前後が70%近くで、それに対応して梁せいは充腹材がほぼ70cm前後、非充腹材で120cmほどであった。また屋根勾配は3分勾配が70%近くとなっている。従ってここでは、Fig. 1 に示されるような大きさの鉄骨骨組を想定している。この骨組が図中に示すような設定外力を受けるとそのモーメント分布は Fig. 1 のようになる。梁、柱部材の最大モーメント位置は隅角部に生じ、ここを含む部分架構を取上げる。梁部材のモーメントが零となる位置は、上記のアンケート調査の結果より設定された平均的な山形ラーメン骨組に対して、骨組隅角部頂点から3.3~4.0mの位置となり、ほぼ柱部材長の1/2として考えてよい。

柱部材のモーメント零点は柱脚ピンの場合当然柱脚にある。従って鉄骨骨組の隅角部の問題を考える今回の実験では、Fig. 1 の太線で示すような梁、柱部材のモーメント零点をピンとした梁、柱の長さ比が1:2の隅角部試験体をとる。

2.2 試験体

以上の考えに基づき、試験体は Table 2 に示されるもの

Table 1 Dimensions of Typical Frame

	充腹材	非充腹材
スパン間隔	15~25m 64%	15~25m 68%
はりせい	0.5~1.0m 81%	1.0~1.5m 56%
屋根勾配	3/10 63%	4/10~3/10 75%
はりモーメント反曲点位置	3.5m~4.0m	3.5~4.0m

はりモーメント反曲点位置は隅角部頂点からの距離

のを考える。試験体は概略実際構造物の1/2縮尺を考えている。充腹材と非充腹材とを比較するため、充腹材は溶接形鋼、非充腹材は山形鋼によるトラス組立材をとる。溶接形鋼による充腹材は、柱材に柱脚 H-175×150×6×9、柱頭 H-350×150×6×9の変断面材、梁材に H-350×150×6×9の断面をもつ。山形鋼によるトラス組立材は弦材 L-65×65×6、ラチス材 L-45×45×4で、構成リベットは 16φ、挟み板 R 9 を使用している。柱材は柱脚せい 225、柱頭 450、梁材はせい 450である。試験体数は充腹材について頂点の桁梁に対応する横補剛材の剛性を変化させて3本、非充腹材のトラス組立材について補剛材剛性、拘束位置及びウェブに当るラチス材の剛性を変化させたもの4体とし、合計7体について実験している。各試験体供材質はSS41相当である。溶接等の焼鈍は行っていない。

2.3 補剛材

実験はできるだけ実際構造物に近い形態で行うことを目標としている。体育館鉄骨フレームでは、主架構フレームの外弦材または外側フランジは Fig. 1 にも示すように母屋、胴縁或は隅角部頂部については、桁行方向の繋ぎ梁等が取付くのが通例で、それらの部材は単に外力を受けるだけではなく、主架構フレームの面外変形を拘束する効果がある。

従って本実験でもそれらの部材に対応する強度、剛性をもつ板材を補剛材として外弦材に配する。

実験に使用した補剛材の剛性は、次のように考えた。補剛材の剛性は繋ぎ材となる母屋、胴縁、或は桁行梁と主架構材の実際の剛性比を求め、この剛性比率を曲げ剛性の伝達率として、実験でもこの比率で補剛材剛性を決定する。

(1) 母屋相当の補剛材対

対象とする実構造物の梁断面を H-700×300×13×24 とすると、弱軸回りの断面2次モーメント  $I_y$  は  $I_y = 10,800\text{cm}^4$  である。

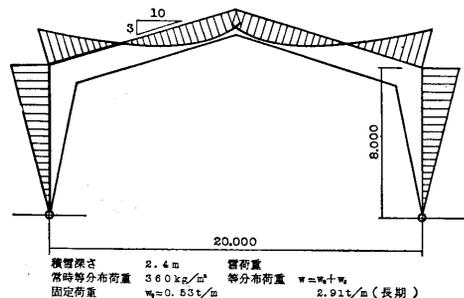


Fig. 1 Moment Distribution



験体ピン支持点に置き、Fig. 3 のモデル図からも判るように試験体を通過した力のみを計測できるようにしている。

歪、変形の測定は Fig. 4 に示すように行っている。Fig. 5 が実験装置の全景である。

3. 隅角部の弾塑性挙動と変形能力

3.1 荷重変形曲線及び塑性挙動

まず各試験体別の荷重変形曲線を中心にその塑性挙動を示す (Fig. 6~12)

(1) T-1

T-1 の試験体はトラス組立材標準タイプで、隅角部で弦材のみを母屋程度の補剛材で補剛した試験体である。外力の増大と共に変形は増大し、 $P=6.0t$  前後で線形関係はなくなり、 $P=11t$  で最大耐力に到達し急激に耐力を低下している。そしてこの時点で圧縮弦材となる内弦材が横方向へ飛び出す形で横座屈変形を生じていることは明らかで、隅角部内弦材はその頂点を最大として柱部材、梁部材共、最大耐力点で著しく横方向変形を増大させている。

(2) T-2

T-2 は T-1 と同じトラス組立材で補剛点位置も同じく外弦材のみであるが、補剛材が桁梁相当の剛材の大きいものを与えている。変形性状はほぼ T-1 と同じ傾向

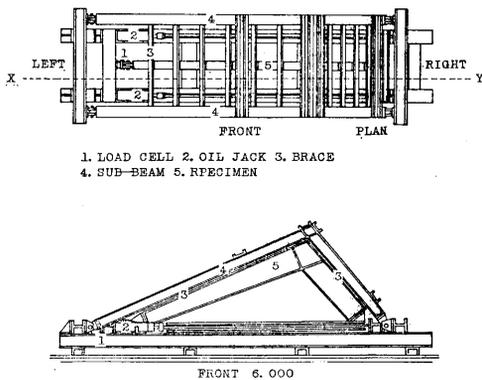


Fig. 2 Set-Up of Testing Frame

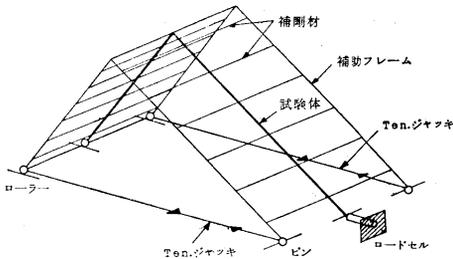


Fig. 3 Loading System of Test

を示しており、補剛材剛性の増大により最大耐力は上昇し  $P_{max}=12.8t$  に達している。耐力低下は T-1 と同様、隅角部内弦材の横座屈により生じている。

(3) T-3

T-3 は T-1, T-2 と同じ条件の試験体で、補剛材の剛性は T-2 と同じ桁梁相当のものを与えているが、隅角部頂点で内・外弦材とも補剛したものである。即ち T-1, T-2 では隅角部頂点で外弦材のみ補剛しただけであるが、T-3 では圧縮となる内弦材も補剛し、その効果を検討したものである。塑性性状は T-1, T-2 と余り変化はないが、最大耐力は  $P_{max}=18.3t$  に達しており T-1 の 1.66 倍、T-2 の 1.43 倍である。面外変形をみると当然ではあるが頂点は殆ど変形しておらず、柱部材長、即ち隅角部頂点と柱脚ピンとの間で圧縮弦材の座屈変形を生じて破壊に至っている。なおこの試験体では最大耐力以後 2 ステップ目で圧縮弦材の局部座屈も発生し、耐力低下は著しいものがあった。

(4) T-4

T-1~3 まだがウェブに相当するトラス材を、二つの山形鋼を挟み板形式で抱合させて構成していたのと同じ、T-4 は山形鋼一つで構成された試験体である。補剛材の条件は T-1 と同じである。ウェブ剛性が弱いためその耐力、剛性も小さくなっている。

(5) F-1

F-1 は充腹材として H 形断面材を対象とした試験体で、補剛材剛性、補剛位置共 T-1 と同じ条件で実験している。トラス組立材との差は明瞭で、隅角部頂点で降伏モーメントを超えて耐力上昇し、最終的に  $P_{max}=19.2t$  にまで達している。この値は降伏荷重の 1.12 倍であり、同じ条件のトラス組立材が  $12.8t$  であったのに比して著しい差が生じている。また変形能力も大きく、端部変位で 5 cm、降伏荷重時の水平変位  $\delta$  の 3.5 倍近くに達している。耐力低下時の補剛のない内弦材の横変形を観察すると殆ど変形しておらず、この時点で先にウェブ及び圧

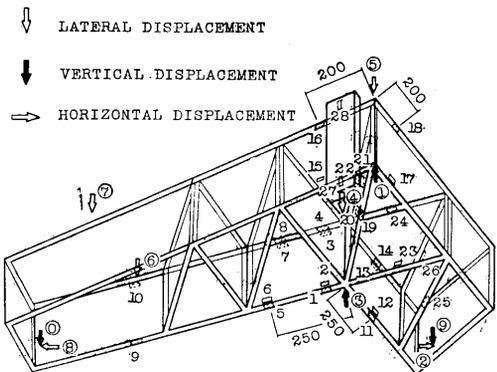


Fig. 4 Measured Points of Strain and Deflection

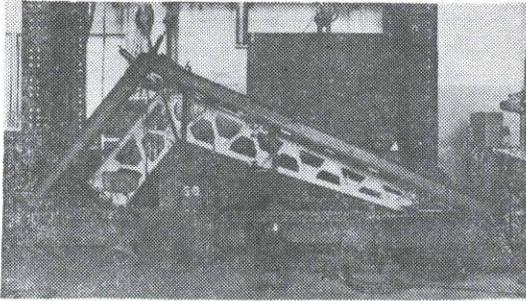


Fig. 5 Experimental Apparatus

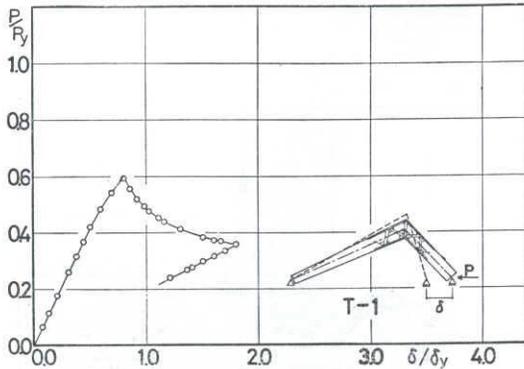


Fig. 6 (a) Load-Deflection Curve

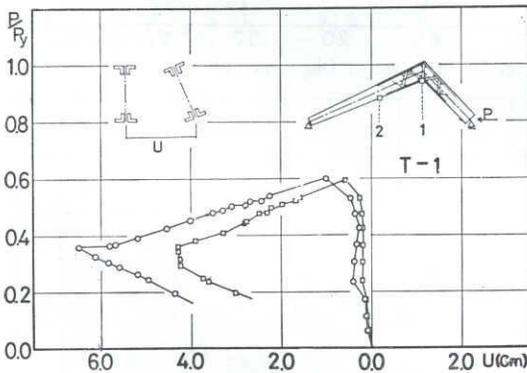


Fig. 6 (b) Lateral Displacement

縮となる内側フランジの局部座屈変形が発生している。

(6) F-2

F-2はF-1と同じ条件の実験であるが、隅角部頂点の補剛材剛性が大きいものである。結果はF-1と殆ど同じ傾向を示しており、やはり圧縮フランジの局部座屈及びパネルゾーンを含むウェブ局部座屈で耐力低下している。F-1より補剛材剛性が大きくなった分だけ変形能力が増大し、面外変形も小さくなっている。

(7) F-3

F-2はF-1, 2と同じ試験体について、更に補剛材剛性を小さくしたものである。最大耐力  $P_{max}=18.0t$  で幾分低下している。然も変形能力は、F-1, F-2に比

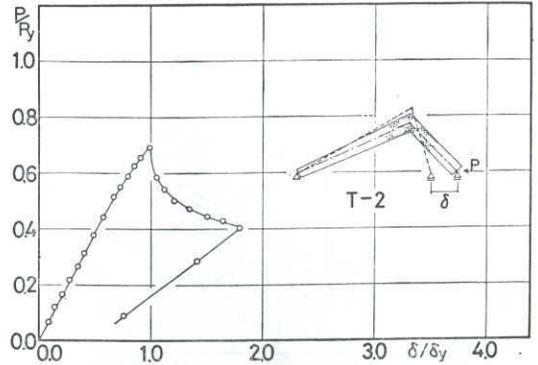


Fig. 7 (a) Load-Deflection Curve

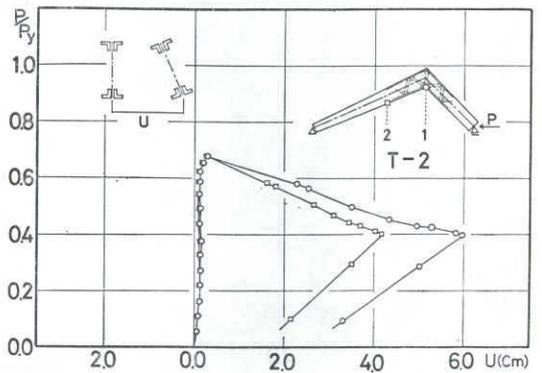


Fig. 7 (b) Lateral Displacement

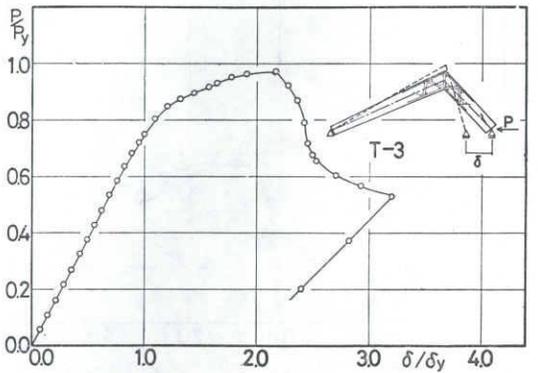


Fig. 8 (a) Load-Deflection Curve

して著しく小さく  $\delta/\delta_y=2.0$  である。その耐力低下時の変形をみるとウェブ、フランジの局部座屈は発生せず、面外変形の結果からも判るように、隅角部圧縮側フランジの面外変形は最大耐力点で著しく増大しており、明らかに隅角部頂点の横方向への飛び出しによる横座屈によって崩壊している。

Fig. 13 が崩壊時の局部座屈変形及び圧縮側弦材の横座屈変形に伴う補剛材の変形を示すものである。

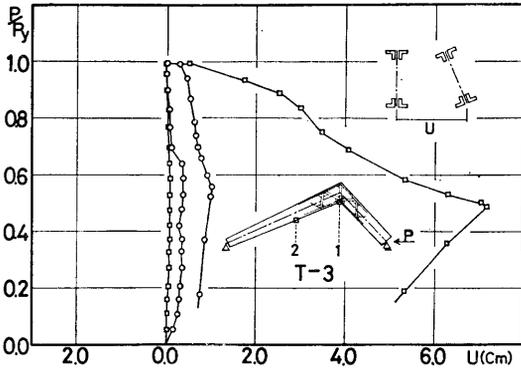


Fig. 8 (b) Lateral Displacement

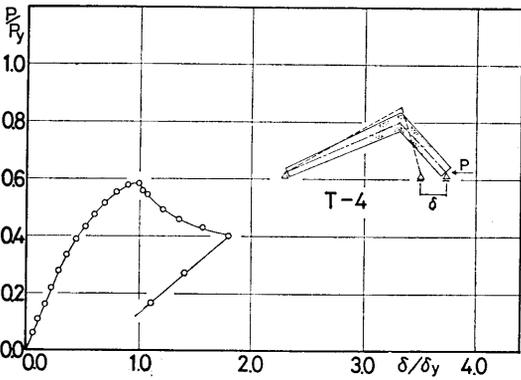


Fig. 9 (a) Load-Deflection Curve

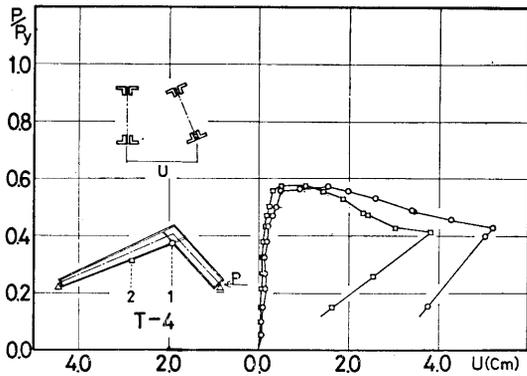


Fig. 9 (b) Lateral Displacement

3.2 隅角部の補剛形式と耐力

トラス組立材の場合、隅角部で圧縮となる内弦材の面外変形を拘束するかどうかは、その耐力に大きな差を生じる。引張外弦材のみ補剛し、圧縮内弦材を補剛しない場合、補剛材の剛性が一番大きいT-2でも  $P_{max}=12.8t$  である。通常これら山形フレームで、柱頭の水平変位がない場合の部材設計では、梁、柱と別々に応力検定を行うことになるが、そうした方法による設計耐力が  $P=10.1t$  であったことと比較すると、最大耐力は1.10~1.26倍の

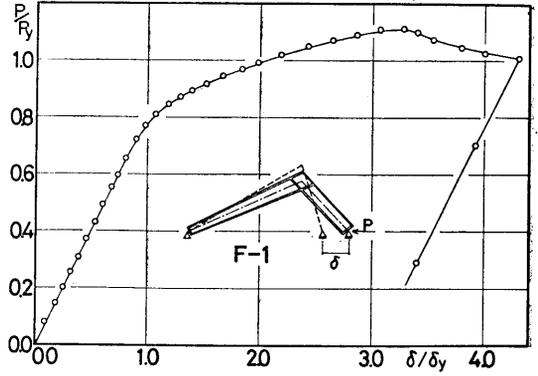


Fig. 10 (a) Load-Deflection Curve

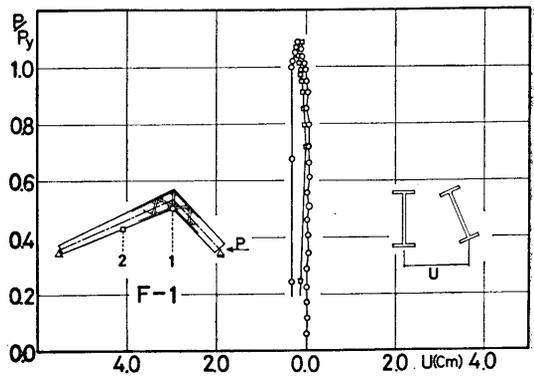


Fig. 10 (b) Lateral Displacement

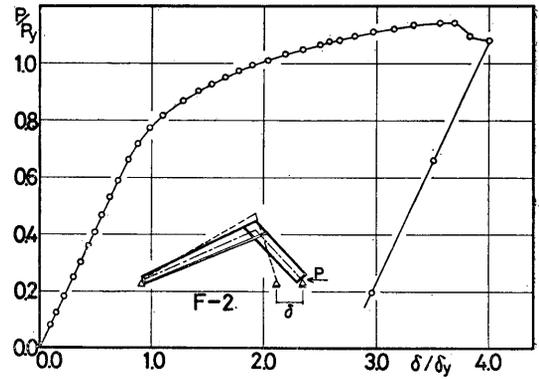


Fig. 11 (a) Load-Deflection Curve

値で、その余剰耐力は少なく、かなり小さな安全率しか確保できないことになる。圧縮となる内弦材も同時に補剛したT-3では最大耐力  $P_{max}=18.8t$  で、ほぼ降伏荷重  $P$  まで到達している。また同じ条件で外弦材のみ補剛したT-1が  $P_{max}=11.0t$  ( $P/P_0=0.60$ ) であったのに比較すると最大耐力  $P_{max}$  は1.66倍、設計耐力の1.86倍にまで達しており内弦材補剛の効果は大きい。

充腹材の場合は、実験は外側フランジのみ補剛した形式だけについて行った。各実験結果からも判るようにそ

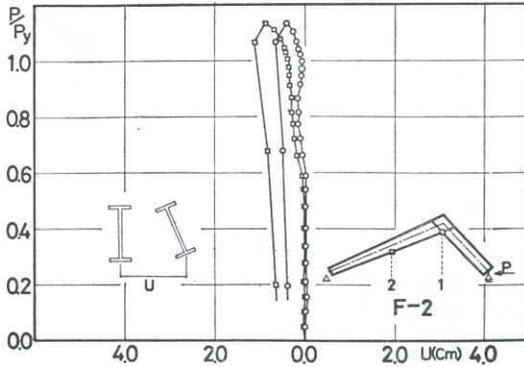


Fig. 11 (b) Lateral Displacement

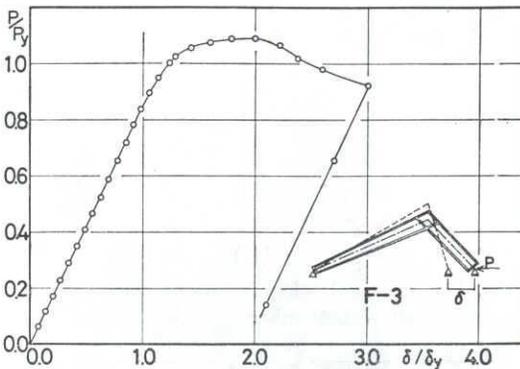


Fig. 12 (a) Load-Deflection Curve

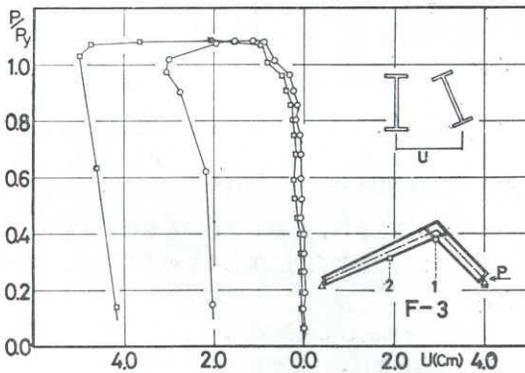


Fig. 12 (b) Lateral Displacement

の最大耐力は降伏荷重  $P_y=16.5t$  を超え、隅角部での全塑性モーメント荷重にまで達しており、設計荷重の2倍近い耐力を示している。従って補剛形式について次のことがいえる。トラス組立材のような非充腹材による隅角部では、内外弦材を拘束すればその最大耐力は外弦材のみ補剛した場合に比して著しい増大を示す。即ち内外両弦材を拘束すれば座屈モードは隅角部頂点に対して複曲率となるが、外弦材のみ補剛したときはウェブの面外剛性の弱さとの相乗効果で圧縮となっている内側の隅角部

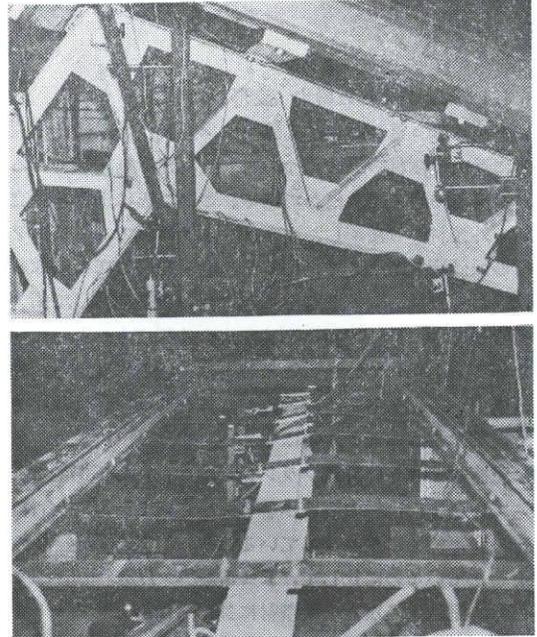


Fig. 13 Local and Lateral Buckling Deformation of Test Specimen

頂点が面外に飛び出し、梁、柱部材を含めた単曲率の座屈モードを示しその補剛効果は少ない。このことはトラス組立材で構成された山形フレームの場合、その隅角部の外弦材のみ補剛しただけで、隅角部を座屈に対する拘束節点として柱、梁に分けて座屈検定することは耐力を過大評価することになり危険側となることを示している。H形鋼等の充腹材の場合は、外弦材のみ補剛しただけで設計荷重に対して十分な耐力を確保しており、梁部材に関する同様な実験結果<sup>1)</sup>を参照しても、隅角部頂点のパネルゾーンの剛性及び外弦材の補剛材剛性さえ十分確保されれば、外弦材のみの補剛でもかなりの耐力が期待し得る。

### 3.3 隅角部の補剛形式と変形能力

トラス組立材の場合、荷重変形関係から判るように引張りとなる外弦材だけ拘束したものは、耐力低下の原因が圧縮弦材隅角部の弾塑性横座屈にあるため、座屈した後最大耐力以後の耐力低下は著しく、変形能力を示す指標としての  $\delta/\delta_y$  も 1.0 にも満たない。隅角部の内外弦材を共に拘束した場合  $\delta/\delta_y=2.0$  になっており、幾分変形能力を増加している。然しその崩壊時には横座屈と局部座屈が同時に発生しておりその耐力低下も鋭角的で殆ど変形能力は期待できない。

充腹材の場合は荷重変形は降伏荷重を超えて耐力、変形共増大しており、外弦材だけの補剛でもパネルゾーン及び補剛材の剛性さえ確保されていれば十分変形能力を

確保できる。

### 3.4 補剛材剛性と耐力・変形能力

トラス組立材の場合、実験では母屋及び桁梁相当の固定に近い補剛材の二つについて外弦材だけ補剛しているが、両者の耐力差は僅かである。このことはトラス組立材の外弦材のみ補剛したときは、トラス材であるウェブ材の面外剛性が小さく、柱・梁の弦材を通しての内弦材が隅角部で横方向へ飛び出した単曲率の座屈波形で耐力低下しており、補剛材の剛性を大きくしても殆ど意味がないことを示している。このことは補剛材に加わった曲げ応力からも明らかで、補剛材に加わる曲げ応力は小さく、剛性の違いによる差は小さい。

充腹材の場合は外側フランジだけを補剛して実験を行っている。補剛材の剛性が著しく小さいF-3の場合は、その変形能力に差が生じている。F-1, F-2が $\delta/\delta_s=4$ を超えているのに比して、F-3はその1/2の $\delta/\delta_s=2$ である。剛性の異なる各補剛材に加わった応力をストレインゲージから逆算してみると、各補剛材共、軸方向力の他に大きな曲げモーメントが加わっていることが判る。これは梁についてのこれまでの報告<sup>1)</sup>と同じ傾向を示しており、その曲げモーメントの大きさは圧縮フランジの横倒れによる曲げモーメントと考え、降伏軸力の2%の値が横力として加わったときの補剛材モーメントと考えてよいであろう。

## 4 山形フレーム設計上での隅角部に対する注意

以上の実験より得られた結果を以下箇条書きする。

(1) トラス組立材で主架構を構成する場合、トラス材のウェブの面外曲げ剛性が小さく、引張材となる外弦材だけを桁梁、母屋等で拘束しても隅角部で内弦材が面外へ変形してしまい、その拘束効果が期待できない。従ってトラス組立材の場合は Fig. 16 に示すように必ず桁面の繋ぎ梁などで隅角部において両弦材を拘束すべきである。更に圧縮となる内弦材の剛性を高めるため、できれば柱の内弦材は梁の外弦材まで貫通させたほうがよい。

(2) H形鋼などの充腹材で主架構を構成する場合も、隅角部では両弦材共その面外変形を拘束するのが望ましい。然し充腹材の場合は非充腹材と違い、柱、梁で構成されるパネルゾーン周辺の強度、剛性が十分確保されていれば引張側となる外側フランジのみ拘束するだけでもかまわない。この時でもできれば Fig. 15(c) に示すように、方杖のような繋ぎ材で圧縮側フランジと引張側フランジに取付く拘束材を連結した方がよい。

(3) 隅角部に設ける拘束材は、両弦材或は両側フラン

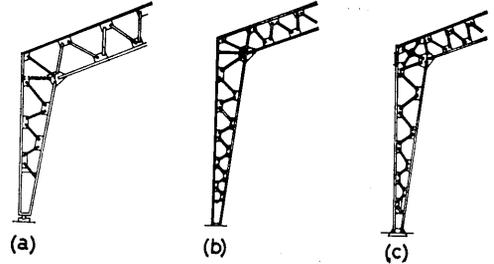


Fig. 14 Lateral Bracing System of Corner Knee of Truss Members

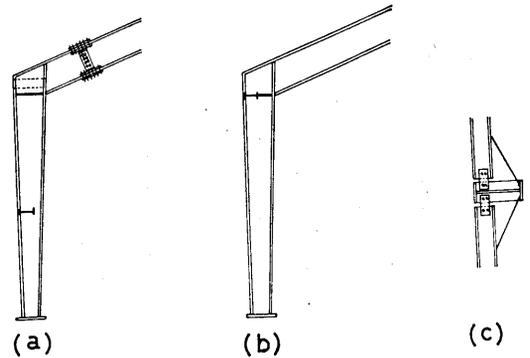


Fig. 15 Lateral Bracing System of Corner Knee of Full Web Members

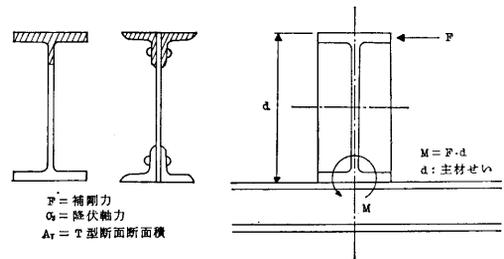


Fig. 16 Lateral Bracing Force

ジに配置するときは、圧縮フランジを含むT型断面の降伏軸力の2%の軸方向力が加わるものとして設計すればよい。

(4) 充腹材に関して引張フランジだけに補剛材を配する場合の設計では、上記の軸方向力だけでなく曲げモーメントに対する十分な配慮が心要である。即ち引張側フランジに配された拘束材は、圧縮側フランジ位置に上記の軸方向力を横力として加えたときに生じる曲げモーメントにも耐えるに十分な強度が心要である (Fig.16参照)

(5) 圧縮内弦材を拘束する部材と各トラス材との接合、取付けには十分注意を要する。

## 参考文献

- 1) 鈴木・小野:「補剛材をもつ梁の座屈後の挙動」昭

和 47年 10月 建築学会大会 (九州)

年 5月 183号 日本建築学会論文報告集

2) 鈴木・小野:「塑性設計梁の補剛材剛性について」  
昭和 47年 12月 202号 日本建築学会論文報告集

4) 日本建築学会:「鋼構造塑性設計指針」昭和 50年 11月

3) 鈴木・久保寺:「柱・はり隅角部の横座屈」昭和 46