

# 水平スチフナとはりフランジに 心ずれがあるH形鋼柱はり接合部に関する研究

(その2. 十字形試験体の逆対称単調載荷実験)

## H-type Steel Column-to-Beam Connection with Misalignment at the Horizontal Stiffener and Beam Flange – Part 2

宮坂 睦夫\* 原 昭 恵\*\* 田中 浩\*\*\*  
Mutsuo MIYASAKA Shohe HARA Hiroshi TANAKA

### Summary

The previous paper reported the effects on the static properties of a misalignment of the horizontal stiffener at the beam-to-column connection of steel building structures. Data had been obtained through tensile tests on model specimens.

Here we discuss the elasto-plastic behavior of the joint of a cruciform specimen during monotone load tests applying antisymmetric loads.

### 1. まえがき

鋼構造柱はり接合部（仕口部）は建築物の強さを左右するかなめとなる部分である。

前報では、この柱はり接合部において、はりフランジと同一レベルに取り付けるのが原則である水平スチフナが、心ずれした時の影響について、仕口の一部を取り出した部分試験体を用いて、柱フランジ厚と心ずれ量をパラメータとした単調引張載荷実験を実施し、その力学的特性の把握を行った結果について報告した。その中で、はりフランジと水平スチフナの板厚を16mmとした場合、柱フランジ厚が12mm～19mmの範囲では、はりフランジ厚に等しいまでの心ずれがあってもはりの曲げ応力伝達は十分可能であり、接合部の耐力低下は見られないという結果を得ている。しかし、前報の実験は、柱フランジに使用する軸方向力の影響を考えない実験であったので、本報では、柱はりを交叉させた十字形試験体に、実構造で地震荷重に相当する逆対称荷重を作用させる単調載荷実験を行い、接合部全体の弾塑性挙動に心ずれがどのような影響を及ぼすのか、検討した結果を報告する。

なお、柱はり接合部は、パネルゾーンと柱はり部材の降伏耐力の相互関係により、水平荷重の挙動に違いが生じるため、パネルゾーンが周辺の柱はり部材に比べかなり早く降伏する形状（弱パネル型と呼ぶ）と、パネルゾーンが周辺の柱はり部材に近い降伏耐力を有する形式（強

パネル型と呼ぶ）の2つの形式について研究を行った。

### 2. 試験体および実験方法

#### (1) 試験体

試験体は、柱貫通形式の十字形強軸交叉型で、柱はBH-350×250×9×16、はりはBH-400×200×9×12とし、SS41規格品の鋼板を用いて溶接製作した。試験体の形状寸法を図-1に、試験体一覧、柱はり部材の断面性能および使用鋼材の機械的性質をそれぞれ表-1、表-2、表-3に示す。

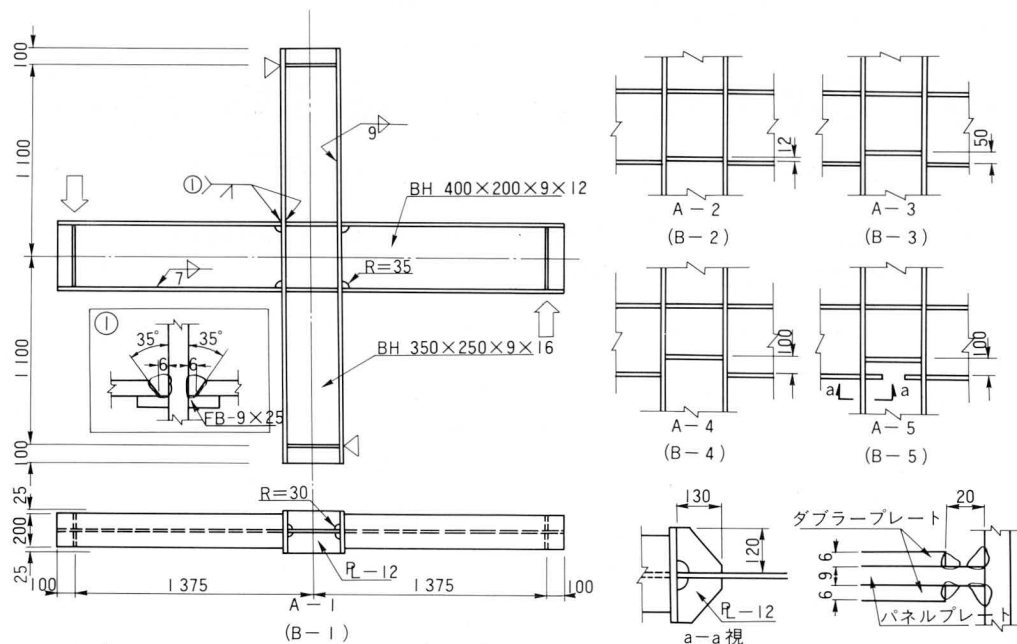
表-1 試験体一覧

記号	水平スチフナの心ずれ量(δmm)	ダブルプレート補強の有無	水平リブの有無
A-1	0	無	無
B-1		有	
A-2	12	無	無
B-2		有	
A-3	50	無	無
B-3		有	
A-4	100	無	無
B-4		有	
A-5	100	無	有
B-5		有	

\* 技術本部技術開発部技術開発課課長代理

\*\*\* 松本工場製造部生産技術課課長代理

\*\* 松本工場製造部次長



注. ( ) 内B試験体は、パネルゾーンをダブルプレートで補強する。

図-1 試験体形状寸法

表-2 部材断面性能

部材	断面寸法 (mm)	断面積 A (cm <sup>2</sup> )	断面二次モーメント I (cm <sup>4</sup> )	断面係数 Z (cm <sup>3</sup> )	塑性断面係数 Zp (cm <sup>3</sup> )
柱	BH-350×250×9×16	108.62	24 740	1 414	1 564
はり	BH-400×200×9×12	81.84	20 220	1 011	1 142

表-3 使用鋼材の機械的性質試験結果

材名	材質	降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張り強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	摘要
PC-6	SS41	2 610	4 130	38.1	ダブルプレート
PC-9	//	2 550	4 190	42.1	柱はりウエブ
PC-12	//	2 600	4 360	44.8	はりフランジ 水平スチフナ
PC-16	//	2 560	4 420	46.3	柱フランジ

(JIS Z 2201 5号試験片)

試験体は弱パネル型のAシリーズ、および板厚6mmのダブルプレートをパネルプレートの両側にすみ肉溶接して補強した強パネル型のBシリーズについて、各々水平スチフナとはりの下フランジが心ずれしない試験体(No. 1)、上方に12mm心ずれした試験体 (No. 2)、50mm心ずれした試験体 (No. 3)、100mm心ずれした試験体 (No. 4)、100mm心ずれして且つ下フランジと同レベルに水平リブを取り付けた試験体 (No. 5) を製作し合計10体とした。

試験体の柱フランジとはりフランジおよび水平スチフナのT継手は、裏当金付の突合せ溶接とし、その他はすみ肉溶接とした。ここで溶接はCO<sub>2</sub>ガスシールドアーク半

自動溶接で行い、突合せ溶接の始末端は鋼製エンドタブを使用して溶接した後、5mm程度残して切断した。

## (2) 実験方法

実験状況を写真-1に示す。

試験体は実験床盤上に水平に設置し、柱端を反力受に単純支持した。また柱はりの面外変形を防止するために、柱はりのスパン中央部分を支持ばりで拘束した。その際移動に伴う摩擦抵抗は、フラットローラーを柱はりと支持ばりの間に挿入して軽減した。

加力には2連動の手動油圧ジャッキ(能力50t、ストローク300mm)を使用して、はり両端に逆対称荷重が均等に加わるように単調載荷した。

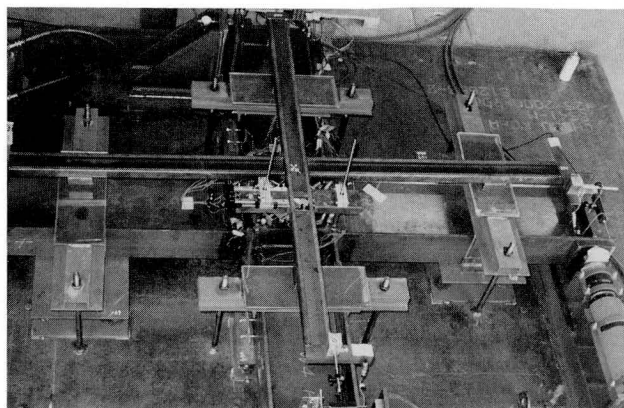


写真-1 実験状況

図-2 に変形測定用のフレームと測定位置を示す。柱及びはりの変形測定は、パネルゾーンの上辺を基準にフレームを取り付け、荷重点変位および柱上部支持点、柱下部支持点の移動による変形を測定した。またパネルゾーン内の4隅に変位計を取り付けて、対角線方向の変位を測定した。

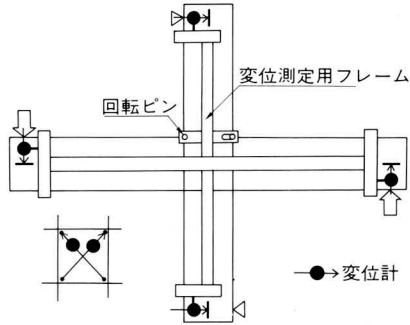


図-2 変位計配置図

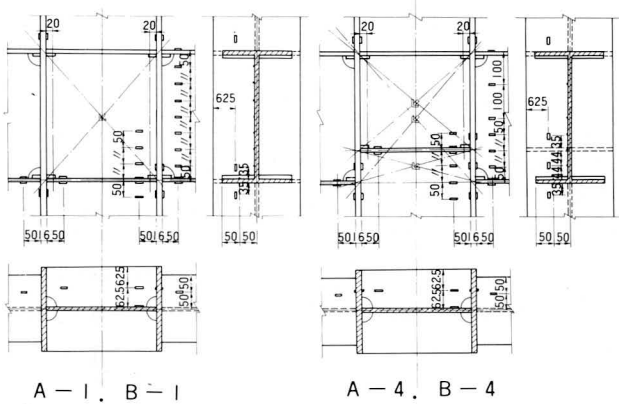


図-3 ひずみゲージ貼付位置

ひずみは図-3 に示す位置にひずみゲージを貼付して、はりの柱接合部近傍のひずみ分布、パネルゾーン4隅近傍の柱フランジ、はりフランジ、水平スチフナに生ずる曲げひずみ、及びパネルゾーン中央のひずみを測定した。

### 3. 実験結果および考察

実験結果より、各試験体の降伏耐力、最大耐力、破壊状況、全体変形、パネルゾーンせん断変形角、接合部近傍はり断面内ひずみ、およびパネルゾーン内主ひずみについて考察する。

なお荷重の実験値は、すべて左右のはり加力点部に配したロードセルから得られた値を平均した数値を使用した。

#### (1) 降伏耐力、最大耐力、破壊状況

表-4 に試験体耐力の計算値と実験値を合わせて示す。また図-4、図-5 にAシリーズおよびBシリーズの耐力と心ずれ量の関係をそれぞれ示す。ここで降伏耐力およびパネルゾーン降伏耐力の実験値は(2)(3)で説明する荷重-全体変形曲線および荷重-パネルゾーンせん断変形曲線より、それぞれGeneral Yield Point法を用いて求めたものである。

パネルゾーンの降伏耐力および最大耐力の計算値は中尾博士の提案式<sup>1)</sup>③、④より降伏パネルモーメントおよび最大パネルモーメントを求め算出した。その際、パネルゾーンは上下はりフランジ間をせいとしたパネル部分を想定した。

表-4 試験体耐力一覧

(単位: ton)

試験体名	計 算 値						実 験 値				
	柱		は り		パネルゾーン		パネルゾーン 降伏耐力	降伏耐力	最大耐力		
	降伏荷重 $cP_Y$	最大耐力 $cP_M$	降伏荷重 $bP_Y$	最大耐力 $bP_M$	降伏耐力 $Q_Y$	最大耐力 $Q_P$					
A-1	31.95	33.71	21.72	24.49	8.89	21.96	9.9	10.3	17.8		
A-2							10.0	10.2	17.8		
A-3							10.1	10.8	18.4		
A-4							9.6	10.3	18.3		
A-5							9.6	10.7	19.6		
B-1	31.95	33.71	21.72	24.49	17.64	30.33	22.2	21.9	28.4		
B-2							17.33	30.04	22.2	21.7	29.1
B-3							17.33	30.04	21.5	21.0	27.8
B-4							15.03	27.84	19.8	19.5	27.9
B-5							15.03	27.84	19.8	19.6	28.6

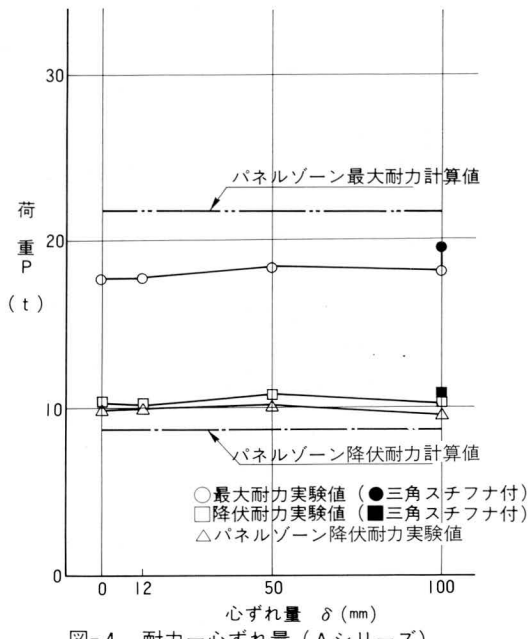


図-4 耐力-心ずれ量 (Aシリーズ)

- ${}_pM_y$ : 降伏パネルモーメント
- ${}_pM_p$ : 最大パネルモーメント
- $V_p$ : パネルゾーン体積 (図-6 a)
- $V_p'$ : " (図-6 b)
- ${}_p\sigma_y$ : パネルゾーンの降伏応力度
- ${}_p\sigma_p$ : パネルゾーンの引張り強さ
- $M_r = {}_mM_y - M_n^*$  (柱はりについて小さい方の値)
- $M_n^*$ :  $M = V_p \cdot {}_p\sigma_y / \sqrt{3}$  のときの材端モーメント

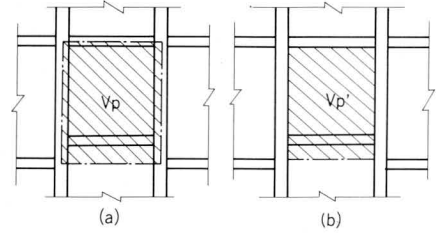


図-6 パネルゾーン体積

Aシリーズでは、降伏耐力実験値はパネルゾーン降伏耐力計算値を18%程度上回り、最大耐力実験値はパネルゾーン最大耐力計算値を16%程度下回った。またはりフランジと水平スチフナの心ずれ量の違いによる降伏耐力、最大耐力への影響は見られない。

Bシリーズでは、降伏耐力の実験値はパネルゾーン降伏耐力計算値を30%程度上回り、最大耐力実験値はパネルゾーン最大耐力計算値と比較的良好に対応している。また心ずれ量が大きくなるほど降伏耐力、最大耐力とも低くなる傾向が見られる。

また水平リブを取り付けたNo.5試験体では、A・Bシリーズともに、降伏耐力には影響がなく、最大耐力には上昇の効果が見られた。

写真-2、写真-3にA-4試験体(弱パネル型)お

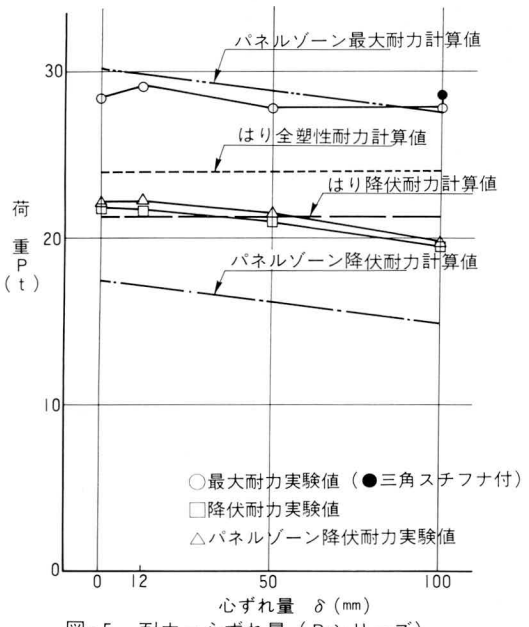


図-5 耐力-心ずれ量 (Bシリーズ)

$${}_mM_y = {}_m\sigma_y \times {}_mZ \dots\dots\dots ①$$

$${}_mM_p = {}_m\sigma_y \times {}_mZ_p \dots\dots\dots ②$$

${}_mM_y$ : 柱はりの降伏曲げモーメント

${}_mM_p$ : 柱はりの全塑性モーメント

${}_m\sigma_y$ : 柱はり部材の降伏応力度

${}_mZ$ : 柱はりの断面係数

${}_mZ_p$ : 柱はりの塑性断面係数

$${}_pM_y = V_p \times {}_p\sigma_y / \sqrt{3} \dots\dots\dots ③$$

$${}_pM_p = V_p' \times {}_p\sigma_p / \sqrt{3} + M_r \dots\dots\dots ④$$

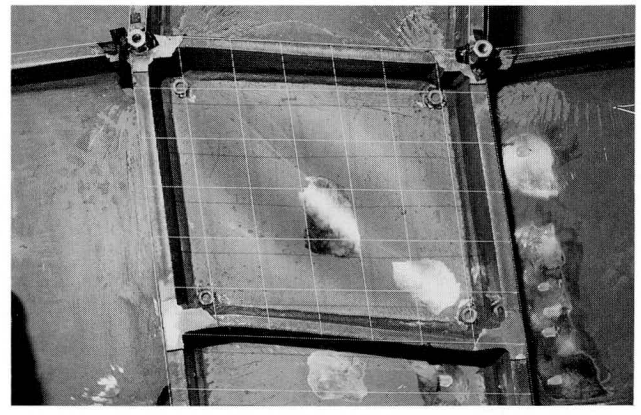


写真-2 A-4試験体接合部破壊状況

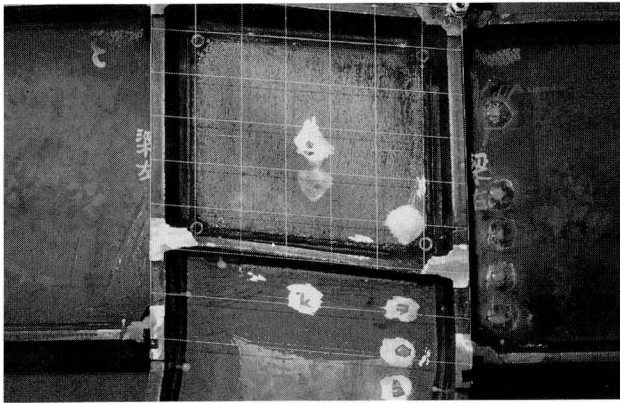


写真-3 B-4試験体接合部破壊状況

よびB-4試験体(強パネル型)の接合部破壊状況を、それぞれ示す。

Aシリーズでは、パネル部分のせん断変形による座屈が著しく進行した。またBシリーズでは、ダブルプレートのみ肉溶接止端部でせん断亀裂が発生した。

## (2) 全体変形

図-7、図-8にAシリーズおよびBシリーズの各試験体における荷重(P)－全体変形( $\delta$ )関係を示す。ここで $\delta$ は柱支持点を基準としたはり加力点の加力方向への移動距離である。なお試験体は、加力点、治具の都合で一度除荷した後再負荷を行った。

表-5に各試験体の塑性率を示す。ここで塑性率はAシリーズでは、荷重を中止した時点の変形量を降伏荷重時の変形量で除したものの、Bシリーズでは、荷重低下が始まった時点の変形量を降伏荷重時の変形量で除したものである。

Aシリーズでは、弾性域において試験体毎のバラつきはみられるものの、心ずれ量による影響は認められず、理論値よりもやや高い剛性を示す。塑性域においても心ずれ量による影響はみられないが、水平リブを取り付けたNo.5試験体が他に比べ高い剛性を示している。塑性率は試験体の荷重中止が、試験体の耐力低下時でなく、加力点治具部が変形進行により危険な状態になった時点であることから、明確な検討はできない。しかし、荷重中止時の塑性率および荷重中止時以前に亀裂の発生や耐力低下の傾向がみられないことから、十分な靱性を有するものと予想される。

Bシリーズでは、弾性域において試験体毎のバラつきはみられるものの心ずれ量による影響は認められず、理論値よりもやや高い剛性を示す。塑性域においては心ずれ

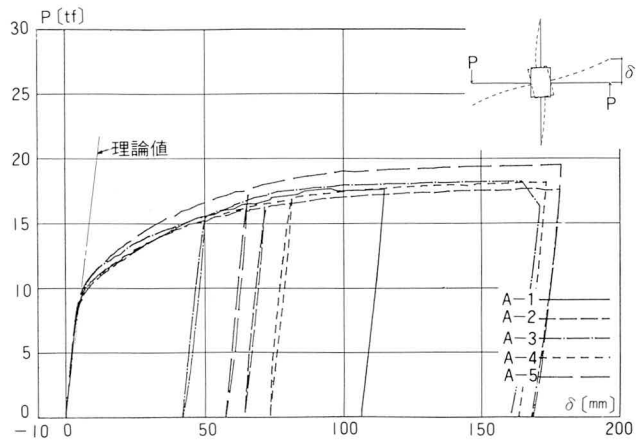


図-7 荷重－全体変形関係(Aシリーズ)

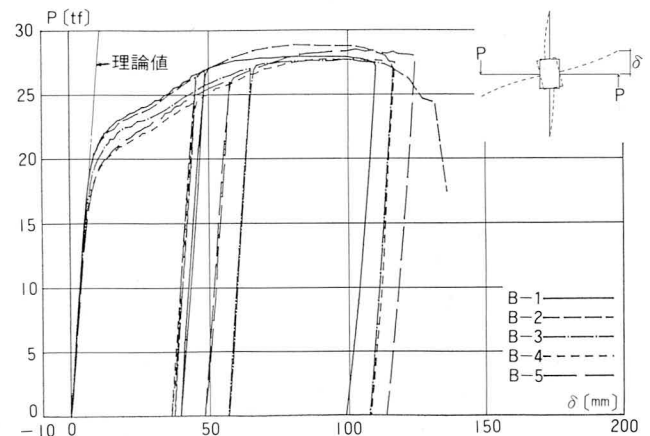


図-8 荷重－全体変形関係(Bシリーズ)

表-5 塑性率

### Aシリーズ

試験体名	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
塑性率	13.6	19.8	19.0	20.4	21.6

塑性率：荷重中止時の変形量を降伏荷重時の変形量で除した値

### Bシリーズ

試験体名	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
塑性率	8.1	8.5	7.9	8.9	9.3

塑性率：荷重低下開始時の変形量を降伏荷重時の変形量で除した値

量が大きくなるほど剛性は低くなる傾向がみられる。また、水平リブを取り付けたNo.5試験体では他に比べ変形量の増加に伴う剛性の低下が少ない。塑性率には心ずれ量の違いによる影響はみられないが、パネルゾーンが十分な変形能力を発揮する以前にダブルプレートのみ肉溶接止端部でせん断亀裂が発生し、耐力の低下が生じているため、十分な靱性を有しているとはいえない。しかし、その点に関しては、ダブルプレートの取り付け

方法を改善する事により解決可能と思われる。

### (3) パネルゾーンせん断変形角

図-9、図-10にAシリーズおよびBシリーズの各試験体における荷重(P) - パネルゾーンせん断変形角( $\gamma$ )関係を示す。 $\gamma$ は柱フランジと2枚の水平スチフナにより囲まれた部分のせん断変形角である。

弾性剛性は、Aシリーズでは理論値と比較的よく対応し、Bシリーズではやや高い傾向を示すが、どちらも心ずれ量の違いによる明確な影響は見られない。塑性域において、Aシリーズでは心ずれ量の違いによる影響は見られないが、水平リブを取り付けたA-5試験体は、他の試験体に比べ比較的高い剛性を示している。Bシリーズでは、心ずれ量が大きくなるほど、剛性が低下する傾向が見られ、この傾向は心ずれ量が100mmのB-4試験体で特に著しい。

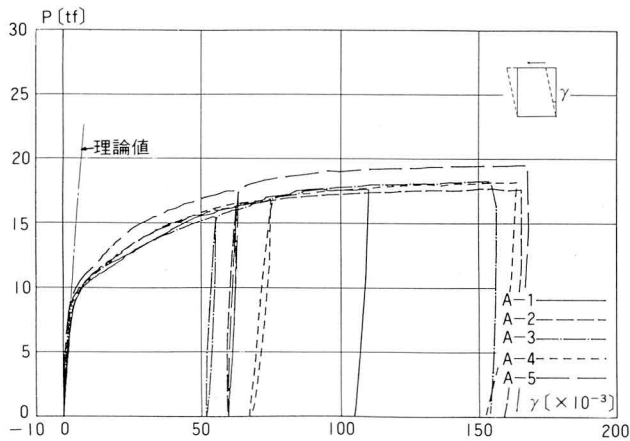


図-9 荷重-パネルゾーンせん断変形角(Aシリーズ)

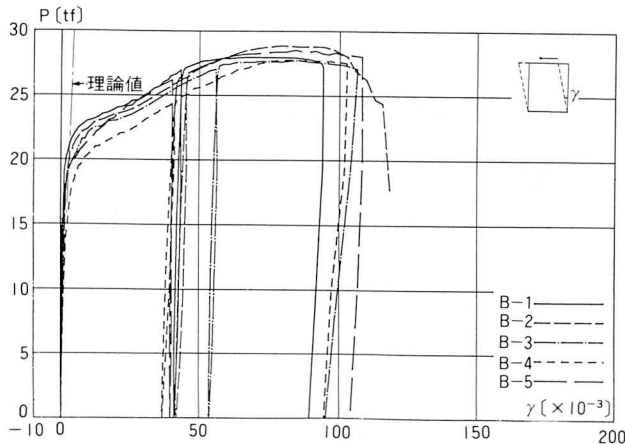


図-10 荷重-パネルゾーンせん断変形角(Bシリーズ)

### (4) 接合部近傍はり断面内ひずみ分布

図-11に柱フランジ面から50mmの位置での、はり材長方向のひずみ分布を示す。Aシリーズでは、パネルゾーンが降伏するまでは、はりの曲げ理論による斜線形のひずみ分布を示し、心ずれの影響は見られない。パネルゾーンが降伏すると、パネルゾーンのせん断変形の影響により逆S字形のひずみ分布を示すようになるが、はりフランジと水平スチフナに心ずれがある場合には、2枚の水平位置間の断面部分のみパネルゾーンのせん断変形の影響を受け、下水平スチフナ位置より下の断面部分は影響を受けないため変形の逆S字型となる。

Bシリーズでは、10t程度まではりの曲げ理論による斜線形のひずみ分布を示し、心ずれの影響は見られない。10tを越えると、パネルゾーンのせん断変形の影響によりやや逆S字の傾向を表しながら曲げひずみが進展して行くが、スチフナに心ずれがある場合には、逆S字の傾向が減少し、かつ下水平スチフナ位置より下の断面部分のひずみの進展がにぶる。

Aシリーズ、Bシリーズとも水平リブによる明確な影響は見られない。

### (5) パネルゾーン内主ひずみ分布

図-12に、柱はり接合部の上下はりフランジ位置間のパネル部分(メインパネル)、および心ずれた水平スチフナ位置で分割した2つのパネル部分(上下パネル)について、それぞれの中央で測定した主ひずみを示す。

Aシリーズでは、はりフランジと水平スチフナの心ずれが大きくなるに伴ない、主ひずみは大きくなる傾向がみられる。

Bシリーズでは、心ずれ量が50mmまでは主ひずみにほとんど違いは見られないが、100mmでは主ひずみが著しく大きくなっている。水平リブを取り付けたNo.5試験体は、A、Bシリーズとも上パネルの主ひずみは小さく下パネルの主ひずみは大きくなる傾向がみられた。

## 4. まとめ

H型鋼を用いた柱はり接合部におけるはりフランジと水平スチフナの心ずれ許容差の見直しを行うために、中低層鉄骨構造物の柱はり接合部を想定した前報<sup>7)</sup>の引張試験に引き続いて、十字型試験体に逆対称荷重を作用させる単調載荷実験を行い、次の結果を得た。

- ① パネルゾーンが周辺の柱はり部材に比べかなり早

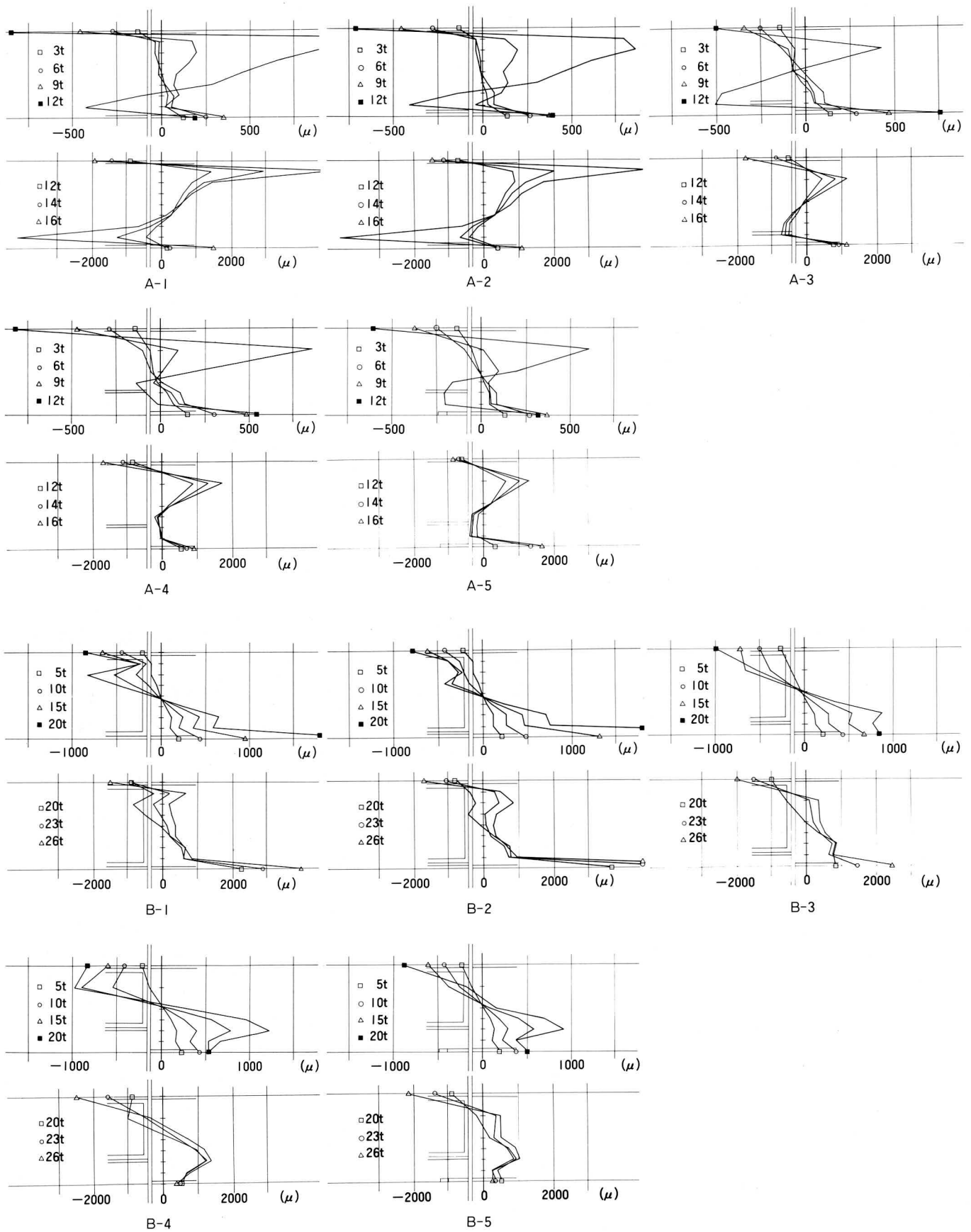


図-11 柱フランジ近傍はり断面内ひずみ分布

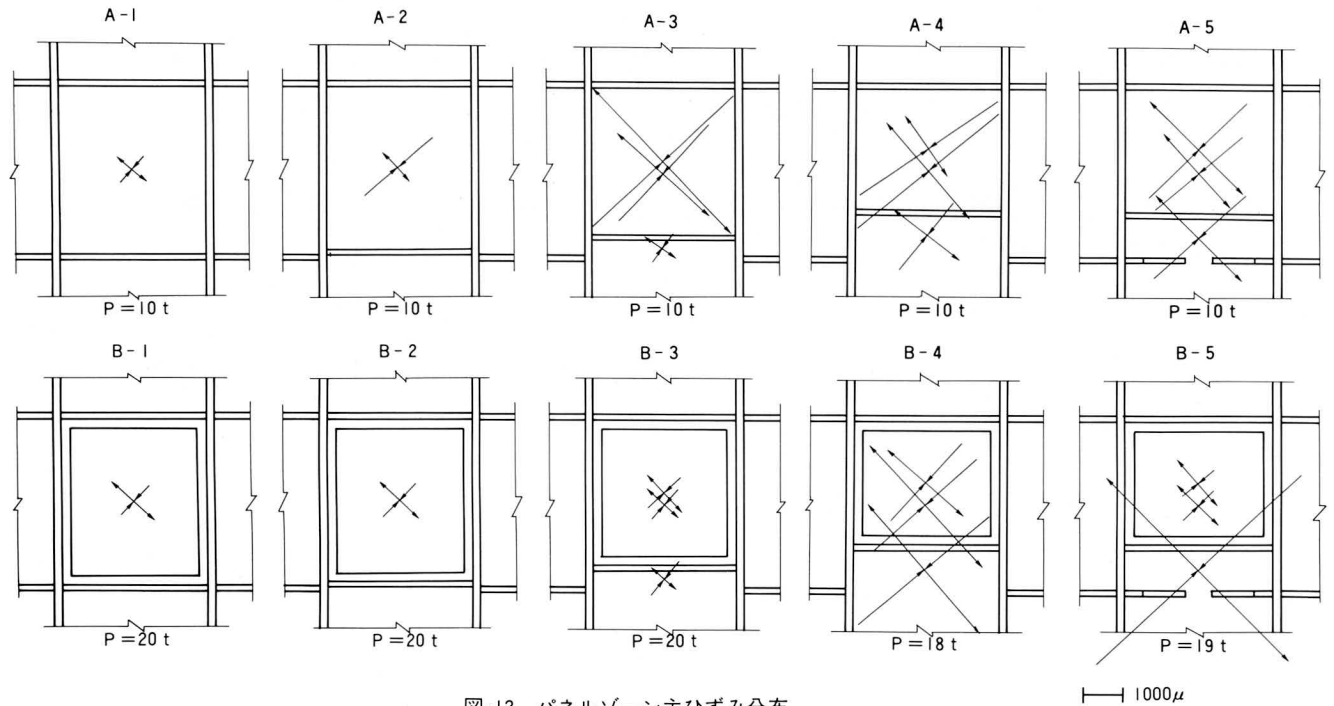


図-12 パネルゾーン主ひずみ分布

く降伏する形式の柱はり接合部では、水平スチフナとはりフランジの心ずれ量がはりせいの25%以内の場合には、耐力、剛性、靱性に心ずれの影響はみられない。

- ② パネルゾーンが周辺の柱はり部材に近い降伏耐力を有する形式の柱はり接合部では、水平スチフナとはりフランジの心ずれ量が大きくなる程、塑性域での剛性は低くなり、接合部も低下する傾向があるが、心ずれ量が10%以内では著しい能力の低下はみられない。
- ③ 一連の研究により、中低層鉄骨構造物の柱はり接合部では、日本建築学会で定める水平スチフナとはりフランジの心ずれ許容差をはりフランジ厚程度まで拡大できる可能性を見出せた。
- ④ 今後新たな心ずれ許容差を提案するためには、さらに水平スチフナとはりフランジの心ずれにより生じる各部応力の影響を増大させる、繰り返し載荷実験や、溶接欠陥を考慮した場合の研究等を含めた検討が今後の課題である。

〔謝辞〕

本研究は信州大学工学部社会開発工学科と当社の共同研究により行ったもので、計画段階から笹川 明教授に懇切な御指導を頂き、実験の実施および資料の整理では大学院生の芦田知之、学部学生の松岡輝記、木暮和人各氏の協力を得ました。ここに深く謝意を表します。

#### 〈参考文献〉

- 1) 加藤、中尾；H形鋼強軸交叉形パネルゾーンの復元力特性評価法の一提案、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）昭和51年10月
- 2) 日本建築学会；鋼構造塑性設計指針
- 3) 藤本、松本、橋本、緑川；偏心水平スチフナを持つH型鋼柱梁溶合部の力学的性状に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1973.10
- 4) 日本鋼構造協会H形鋼構造接合部特別委員会・鋼材倶楽部；H形鋼構造標準接合部（I）
- 5) 日本鋼構造協会接合小委員会・鋼材倶楽部；鋼構造接合資料集成(2) 溶接接合（建築編）
- 6) 森田、浦、植野；柱はり接合部のスチフナ補強に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集第376号、昭和62年6月
- 7) 原、宮坂；水平スチフナとはりフランジに心ずれがあるH形鋼柱はり接合部に関する研究（その1．接合部はりフランジ面の応力伝達に及ぼす影響について）、宮地技報No.5、1989
- 8) 芦田、笹川、田守、宮坂；心ずれ量が接合部の応力伝達に及ぼす影響、水平スチフナとはりフランジに心ずれがある柱はり接合部に関する研究（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989.10