

柱、はり接合部の補強効果と復元力特性

中山 昭夫*・金 多 潔**

Study on the Restoring Force Characteristics and Stiffness
of Beam-to-column Connections of Wide Flange

Akio NAKAYAMA and Kiyoshi KANETA

ABSTRACT

In general, we use the hypotheses that the joints of framework are rigid when we analyze the frame structure. Namely the area of the joint is not taken into account. This idealization, however, is doubtful for actual structure especially for steel structures. The beam-to-column connection, ie, the panel zone will be fairly deformed during the strong motion earthquake.

The authors examine, in this paper, the stiffness of panel zone and carried out the experimental work on the restoring characteristics and the stiffening effect of panel zone of usual wide flange. The experimental results are described in detail herein.

§ 1. 研究の目的

ラーメン架構等の不静定骨組における構造解析は節点が剛で、変形後も各部材は変形前の角度を保つという前提条件のもとで成立する。この剛節点の仮定は実構造物において厳密な意味では成立しない。特に鋼構造物の節点、すなわち柱・はり接合部パネルゾーンは比較的薄肉のウェブ部分で成り立っているため、その変形量は無視できない。地震国である我国においては他の荷重に比較して水平力が大きいため、水平力によるパネル部のせん断変形が特に問題となってくる。このような水平荷重時におけるパネルゾーンの変形を指摘した「日置他」の研究⁽¹⁾、及びパネルゾーンのせん断変形を実験的に明きらかにした「仲、加藤他」の一連の研究⁽²⁾⁽³⁾、パネルゾーンの設計式を提案した「田中」⁽⁴⁾、及び「中尾」⁽⁵⁾の研究等多数の研究が存在するが、本論ではパネルゾーンの変形を押えて単組解析の基本仮定である柱、はり接合部は剛であるという仮定に近づけるためにはどのように接合部を補強すべきかということを目的としたものである。パネルゾーンの補強には、いわゆるダブルプレートによって

パネル厚を大きくして補強する方法と、柱と直交方向にH形鋼を十字形断面に組む方法が考えられるが、ここでは、その2つの方法によるパネルゾーンの補強効果について、実験を行なった結果について述べる。またパネルゾーン周辺の応力を解析するために光弾性モデルによる応力解析を行なった結果についても検討を加えた。

§ 2. 実験の概要

2. 1 試験体

本研究ではパネルゾーンの補強効果を検討するため、前述したように2通りの補強方法について比較、検討を行う。H型鋼の強軸方向パネルは無補強の場合、柱・はりが降伏する以前にパネル部の降伏が先行する、いわゆる Weak Panel Type となる。このような無補強のパネルゾーンに対して、ダブルプレートをパネル部に溶接した場合、及びパネルに直交方向にH形鋼を補強し十字形断面とした場合は Strong Panel Type となり、接合部の変形は当然小さくなる。本実験ではこのようなパネルゾーンの補強効果を定量的に把握するため、以下に示す4種類の試験体を用いた。なお使用した鋼材は全てS

M50Aである。

(1) Aタイプ試験体

Aタイプ試験体は補強を行わない試験体で、パネルゾーンはH型鋼ウェブのみの、いわゆる Weak Panel Type の試験体である。使用鋼材は柱・はり共H-396×199×7×11である。(Fig-1参照)

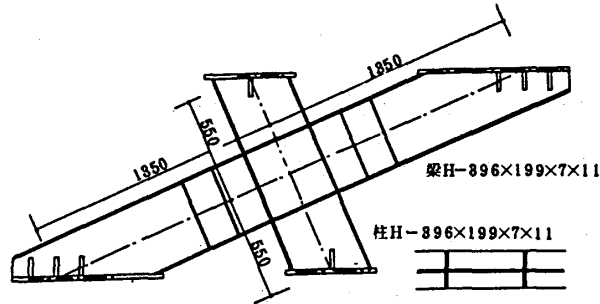


Fig-1 Aタイプ試験体

(2) Bタイプ試験体

Bタイプ試験体はパネルゾーンにダブルプレートを溶接して補強した Strong Panel Type の試験体である。補強用ダブルプレートは2種類で、B1タイプについてはプレートの厚み4mm、B2タイプはプレート厚み7mmである。使用鋼材は柱、はり共H-396×199×7×11で、パネルゾーンの降伏を先行させるため柱フランジにH-12×150のカバープレート(カバープレート)を溶接して補強を行っている。(Fig-2参照)

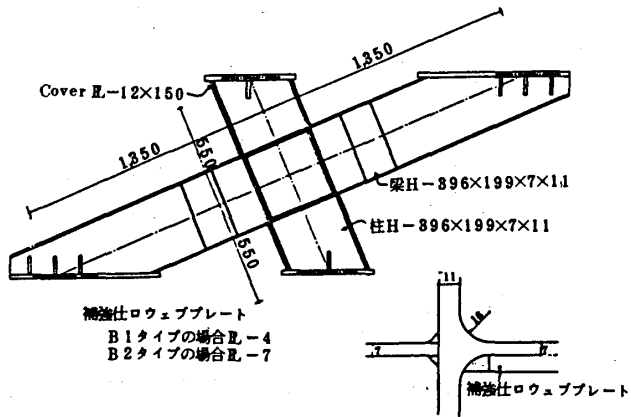


Fig-2 Bタイプ試験体

(3) Cタイプ試験体

Cタイプ試験体はAタイプ試験体の柱に2CT-198×199×7×11を溶接して十字形断面としたものである。この試験体は十字形断面におけるダイヤフラムの補強効果を検討するための試験体であって、Fig-3に示されるように柱の直交方向フランジはダイヤフラムによって固定されていない。柱ステイフナーははりのフランジ幅だけしか存在せず、柱の直交方向フランジはフリーに近い状態となっている。すなわちこの試験体は Weak

Panel Type と Strong Panel Type の中間といえることができる。

(4) Dタイプ試験体

Dタイプ試験体はCタイプと全く同じ部材、断面を有する試験体であるが、Cタイプと異なる点は柱の直交方向フランジが水平ダイヤフラムにより固定されている点である。すなわちCタイプ試験体では柱の直交方向フランジはパネルゾーンと全く独立の変形をすることが可能であるが、Dタイプの場合は水平ダイヤフラムにより、柱の直交方向フランジはパネルゾーンの変形と同じ変形をするように計画されている。またこのような試験体の寸法効果を観察するため、柱、はりの部材を小さくした試験体も実験を行なった。A、B、C試験体と同じ部材を使った試験体をD1タイプとし、柱、はりの部材をH-350×175×7×11を用いた試験体をD2タイプとする。

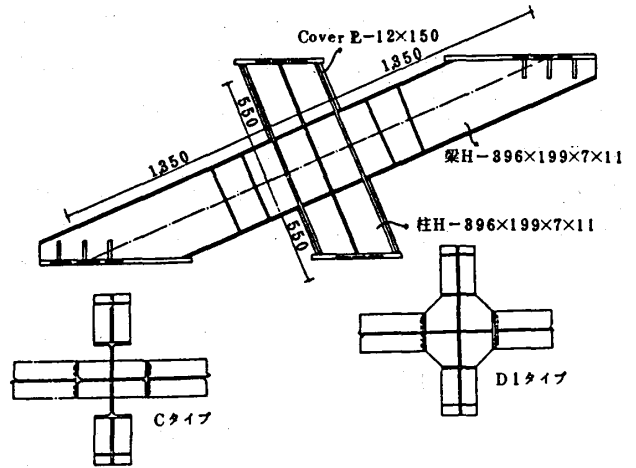


Fig-3 C及びDタイプの試験体

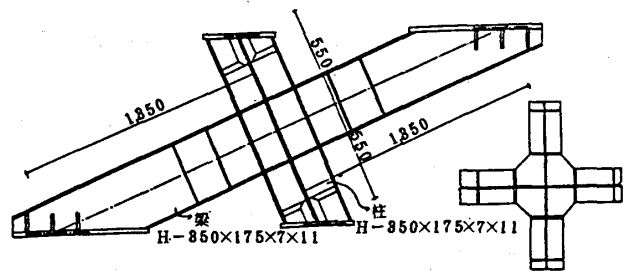


Fig-4 D2タイプ試験体

2.2 実験方法

(1) 荷重

荷重は京都大学工学部坂記念館の300ton長柱試験機によって加力した。試験体と加力装置の概要はFig-5に示す通りである。試験体の右上部すなわち柱上端をピン支持、他の三点をローラー支持となるように支持金物を取り付けた。荷重に際しては荷重が正しく試験体の重心にかかるように水準器及び重錘で調整を行なった。

荷重のかけ方は試験体の中央変位が直線性を保つ範囲（これを弾性域と考える）を標準とし、弾性域内の荷重で数回載荷した後、一部塑性域に入れ除荷した。更に弾塑性域での載荷の後、全体が塑性に入ったと考えられる時点まで載荷し、この後測定装置をすべて取り除き、最終荷重まで載荷を行なった。荷重段階は原則として10 tonおきとし、塑性域では5 ton おきとした。

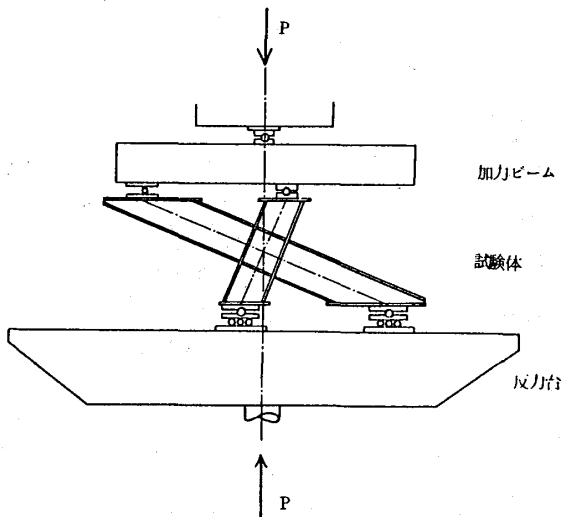


Fig-5 実験の概要

(2) 測定

変位の測定はFig-6に示すように1/100mmダイヤルゲージを配置して、各点の変位を測定した。ひずみに対してはパネルゾーン内、及びその近傍に単軸及び45°ロゼットのワイヤーストレンゲージを点貼した。

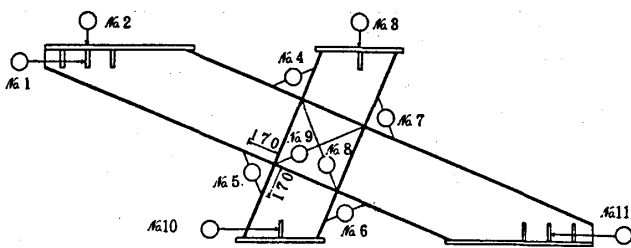


Fig-6 変位の測定

§ 3 実験結果

実験に先立ち、試験体各部より採取した1号試験片による素材試験を行なったが、各試験体より得られた引張り試験の結果、平均値として以下の値を採用した。

降伏点強度	$\sigma_y = 414.1 \text{ kg/mm}^2$
引張強度	$\sigma_b = 575.6 \text{ kg/mm}^2$
伸び	$\epsilon = 23.6\%$

代表的な素材試験の荷重-ひずみ曲線をFig-7に示す。

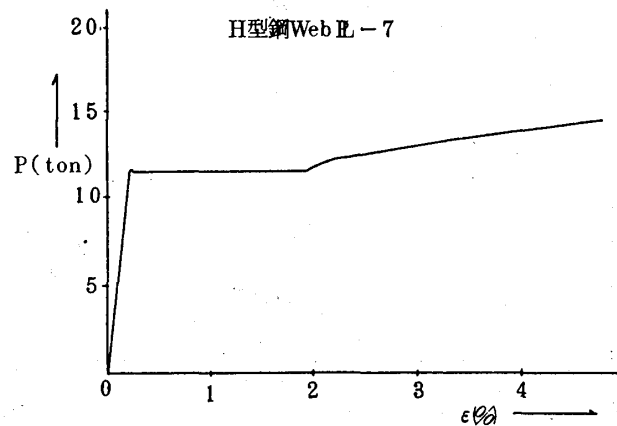


Fig-7 素材の荷重-ひずみ曲線

次に各試験体の実験の結果を以下に示す。

(1) Aタイプ試験体

Aタイプ試験体の荷重-変形曲線をFig-8~Fig-10に示す。Fig-6に示すダイヤルゲージNo.2及びNo.3の鉛直方向変位、Fig-9は同No.4~No.7のパネルゾーン周辺の変位、Fig-10は同No.8及びNo.9のパネルゾーンのせん断変形をいずれも荷重毎にプロットしたものである。これらの結果から明らかなように、Aタイプの場合、荷重変形曲線が直線性を示す弾性限荷重はほぼ80 ton程度だと考えられる。この降伏荷重を過ぎると試験体が局部的に降伏を始める。このことにより徐々に剛性が低下して、100 tonを過ぎたあたりからパネルゾーンが座屈を起し、それ以後剛性の低下が著しくなった。130 ton程度からはほとんど剛性は上がりず変形だけが進行していき155 tonで計測は中止にした。この後、測定器具をすべて取り除き最終耐力まで加力を行なった。なお最終耐力は170.5 tonであった。

(2) Bタイプ試験体

Bタイプ試験体の実験結果をFig-11~Fig-16に示す。Fig-11~Fig-13はB1タイプ、Fig-14~Fig-16はB2タイプの実験結果で荷重-変形曲線の順序はAタイプと同様である。B1及びB2タイプ共予想されたよりかなり低い荷重で直線性を失う結果がでてきている。すなわちパネルゾーンの耐力はパネルの厚さに比例するため、B1タイプの場合は約1.5倍、B2タイプの場合は2倍の耐力が期待されるが、両方共それよりかなり早期に降伏した。この理由は溶接したダブルプレートの構面外座屈による。Bタイプ試験体が直線性を示さなくなるのはB1タイプではほぼ90 ton、B2タイプで110 ton程度であるが、この荷重域を過ぎ

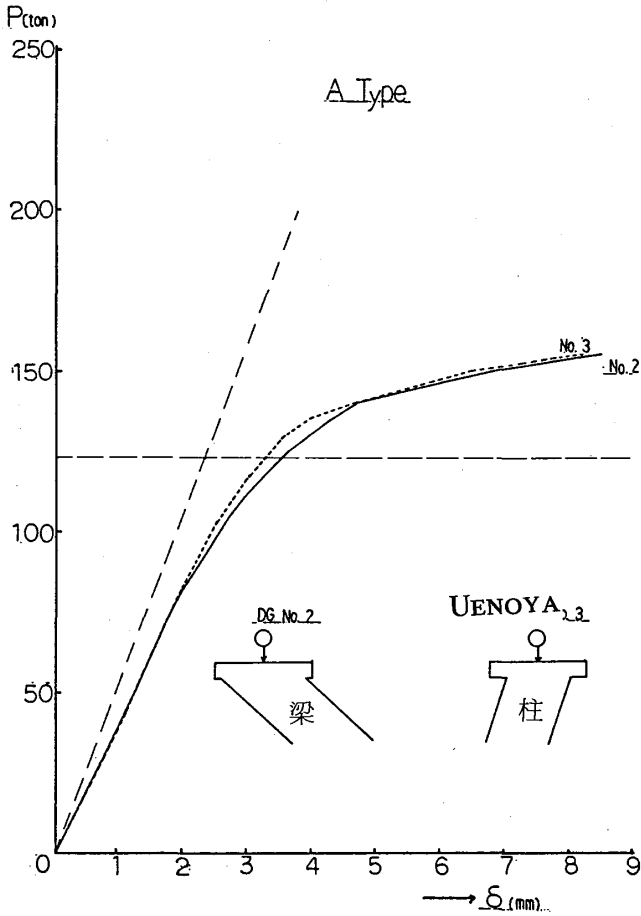


Fig-8 Aタイプの荷重-変位曲線

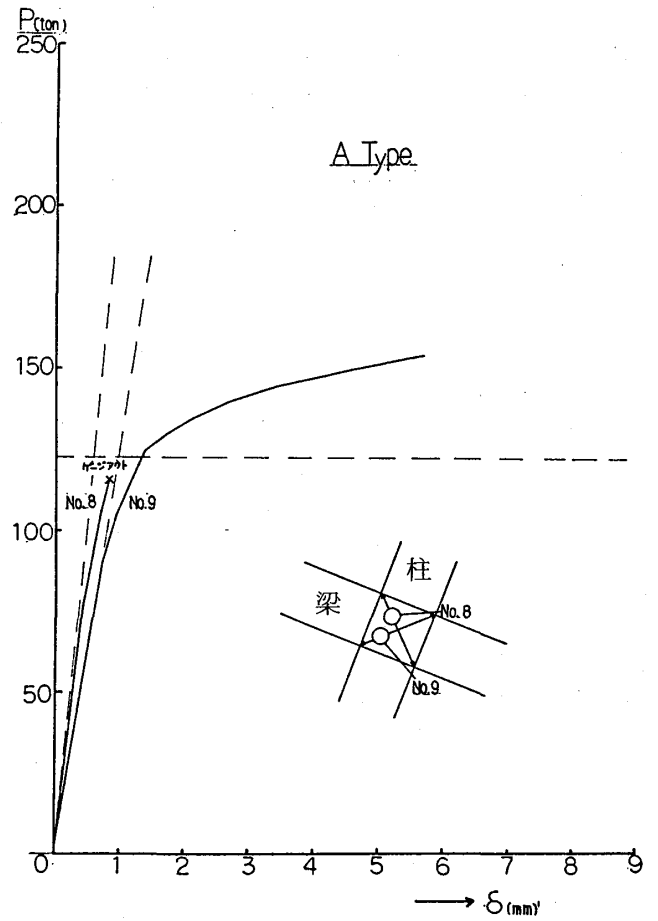


Fig-10 Aタイプ、パネルゾーンの変位

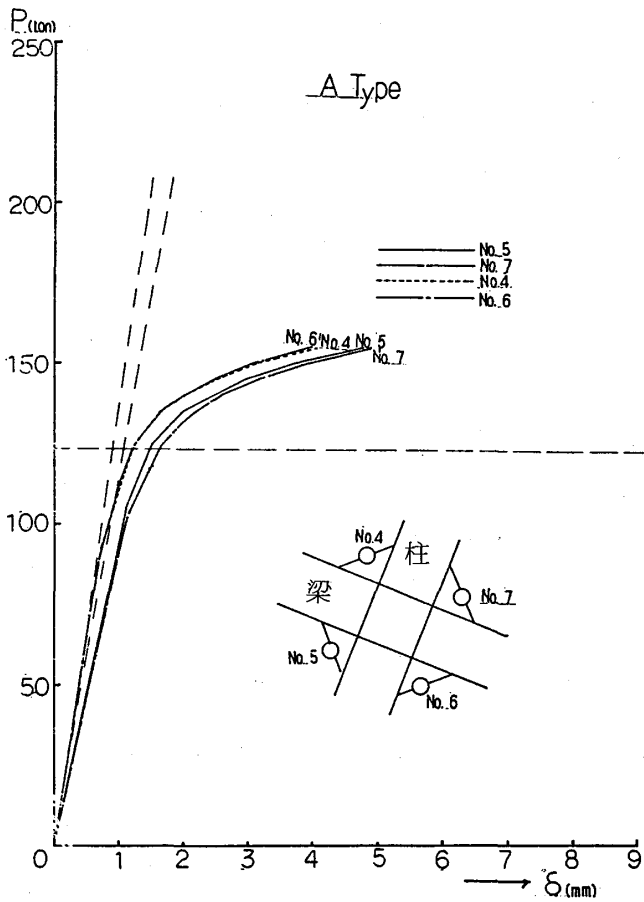


Fig-9 Aタイプ、パネルゾーン周辺の変位

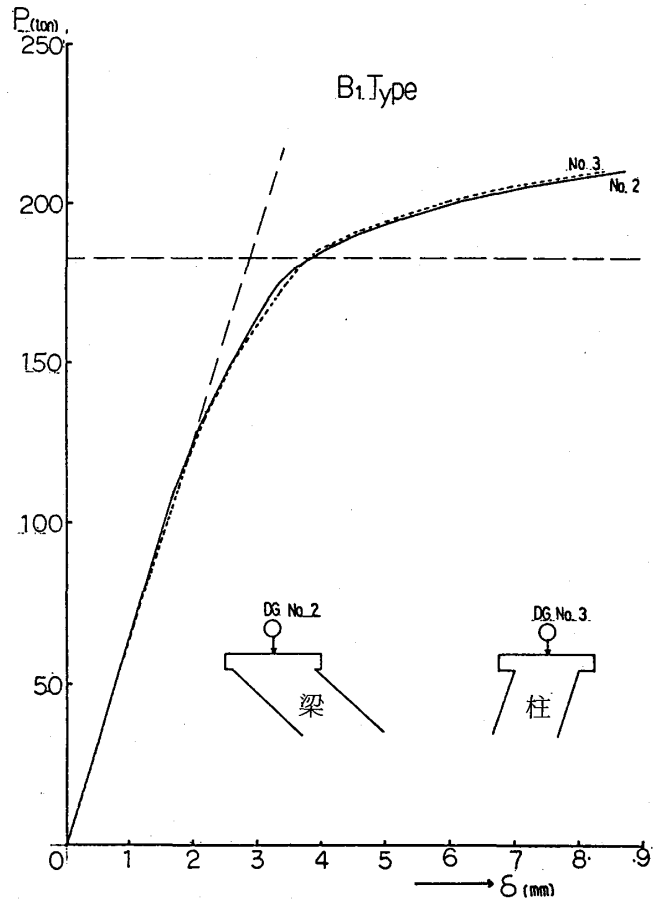


Fig-11 B1タイプの荷重-変位曲線

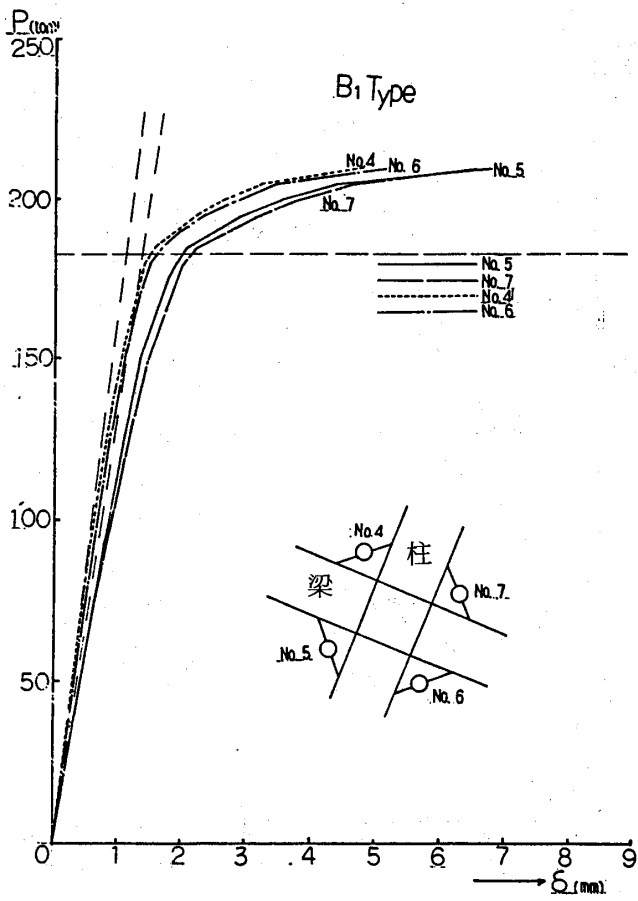


Fig-12 B1タイプ, パネルゾーン周辺の変位

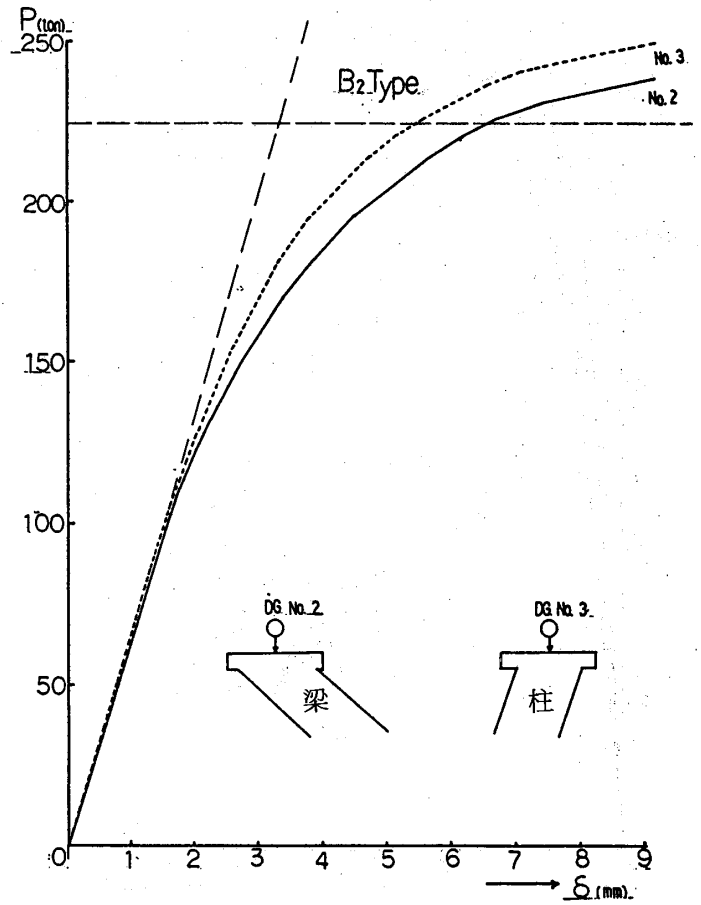


Fig-14 B2タイプの荷重-変位曲線

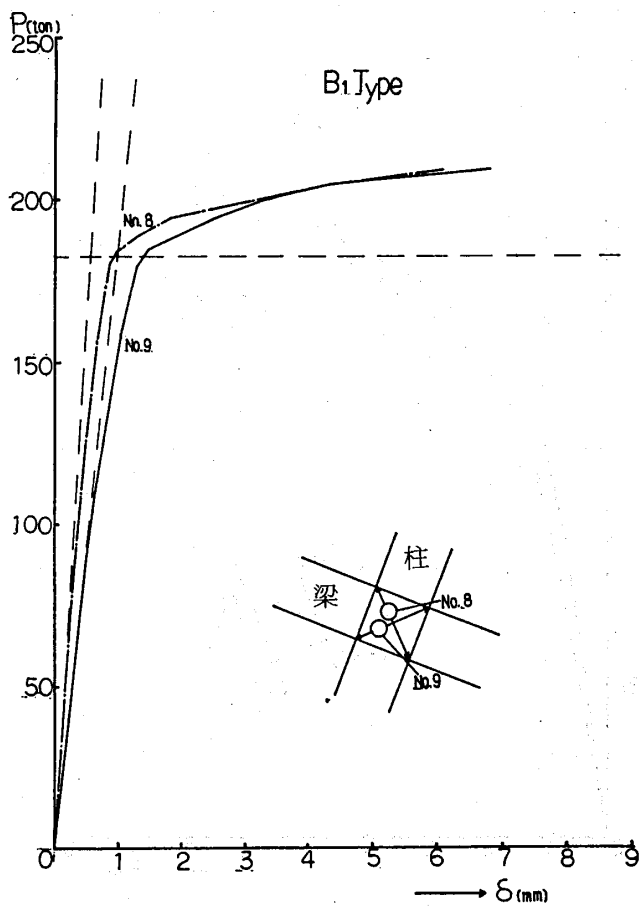


Fig-13 B1タイプ, パネルゾーンの変位

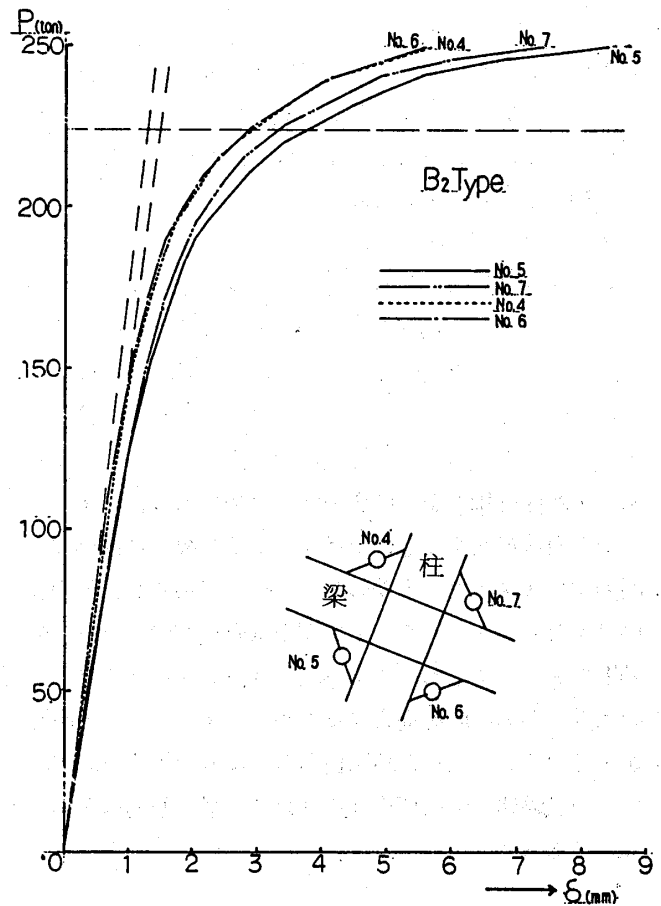


Fig-15 B2タイプ, パネルゾーン周辺の変位

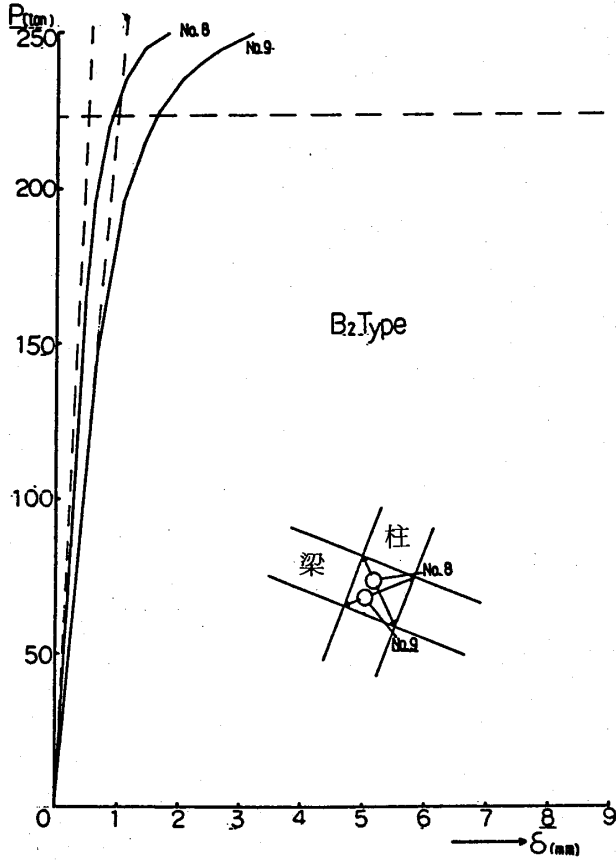


Fig-16 B2タイプ、パネルゾーンの変位

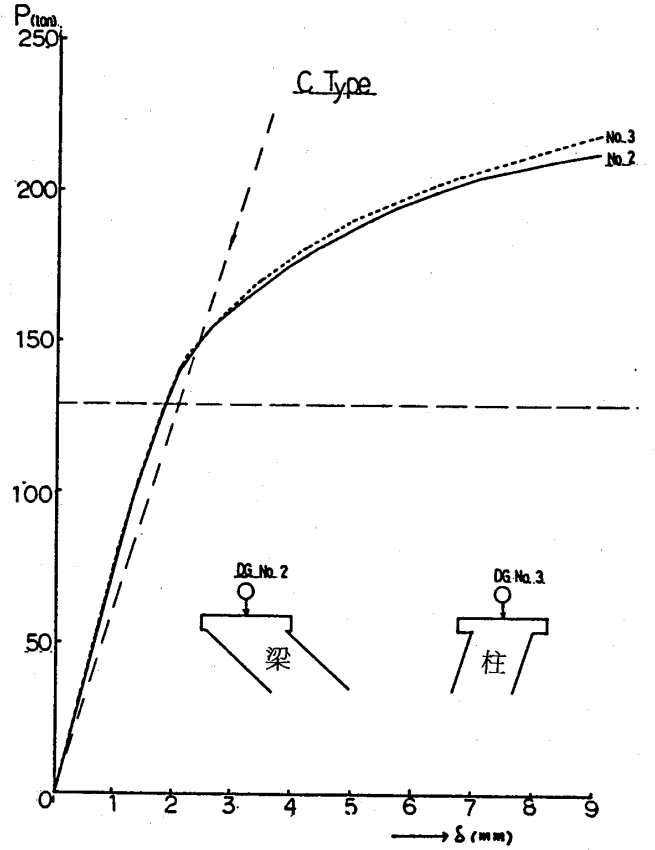


Fig-17 Cタイプの荷重-変位曲線

たあたりからダブルブレイの座屈が顕著に現われ、剛性が徐々に低下していった。最終的に耐力はパネルの座屈によって支配されB1タイプは210ton、B2タイプは260tonで最大耐力に達した。

(3) Cタイプ試験体

Cタイプ試験体の荷重-変形曲線をFig-17, Fig-18に示す。Fig-17は鉛直方向変位, Fig-18はパネルゾーン周囲の変位である。この試験体の場合、柱は十字断面になってはいるが、パネルゾーン部分はダイヤフラムで一体とした補強にはなっていない。すなわち十字断面は軸力を主に負担するためであり、パネルゾーンを直接補強するものではない。それ故、初期剛性、耐力共にAタイプと大差のない試験体であるが、その違いはかなり大きい。この主な理由は直交方向フランジの効果である。すなわち直交方向フランジがパネルゾーンの面外方向の変形を拘束するため、パネルゾーンの座屈が生じなくなり、その結果耐力がかなり上昇する。実際にこの試験体の降伏荷重は約90ton 最大耐力は240tonであった。

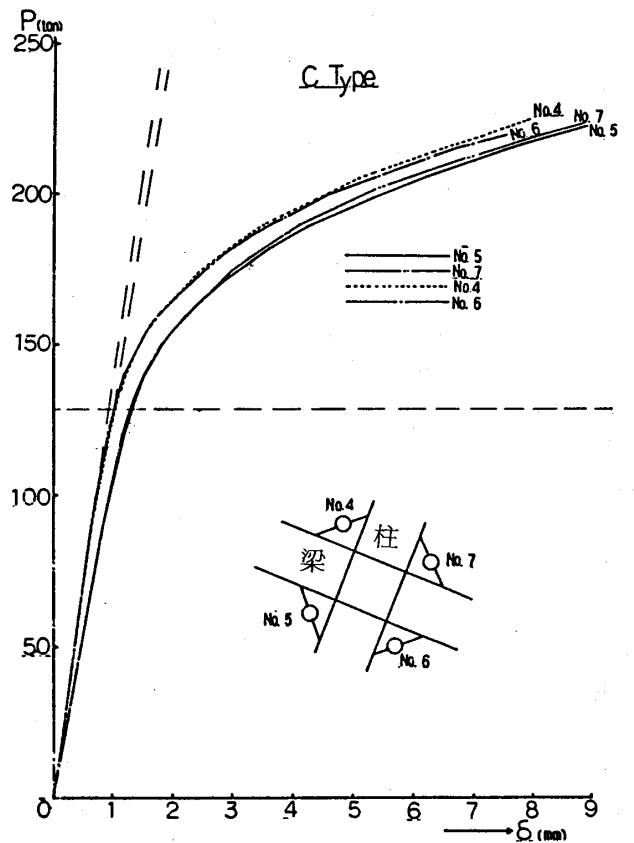


Fig-18 Cタイプ、パネルゾーン周囲の変位

(4) D1タイプ試験体

D1タイプ試験体の荷重と鉛直方向変位の関係を Fig-19, パネルゾーン周辺の変位と荷重の関係を Fig-20 に示す。Dタイプの試験体は前述したように Strong Panel Type の試験体であり, 剛性及び耐力ともに相当大きくなる。

図から明らかなように剛性及び耐力共にかなり大きく, 補強効果が相当大きいことを示している。この試験体の弾性限荷重は 130ton 程度であり, 最大耐力は 300ton を越えてもまだ破壊せず, 容量オーバーのため荷重をとりやめた。パネルゾーンの座屈が押さえられているためと直交方向フランジが水平ダイヤフラムの拘束によりパネルゾーンと同じせん断変形を受けるために, 剛性及び耐力共非常に大きい。

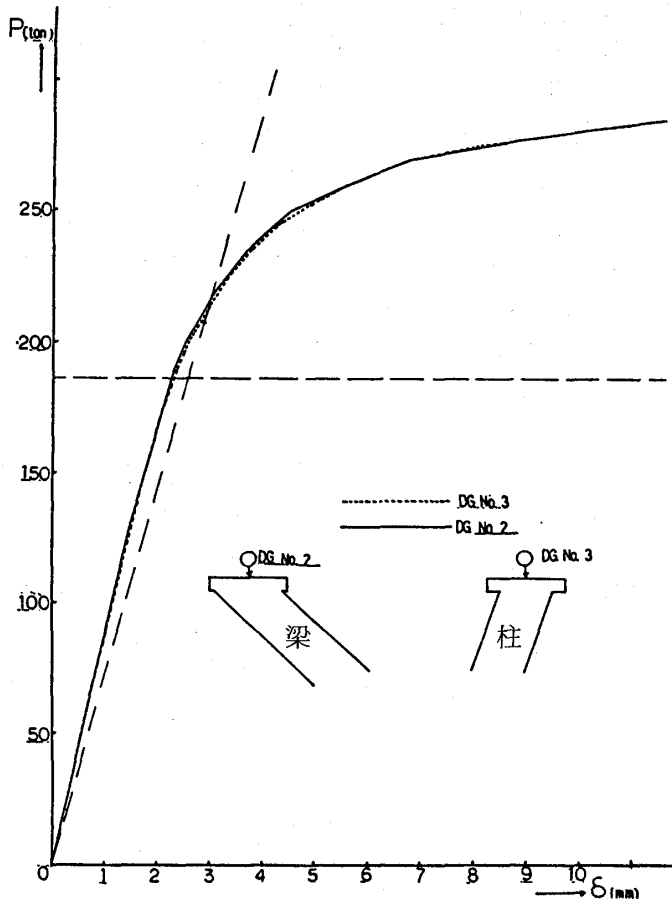


Fig-19 D1タイプの荷重-変位曲線

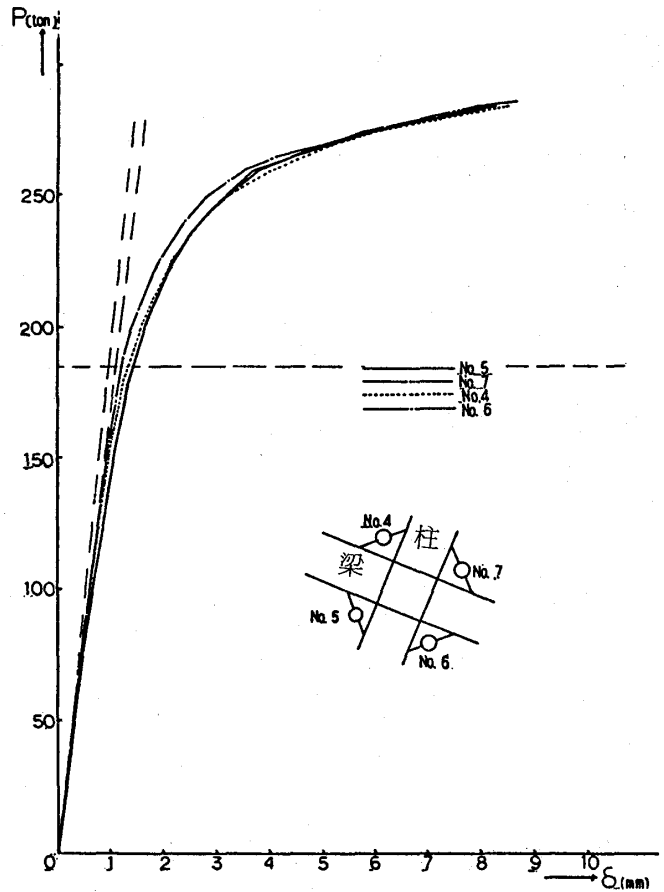


Fig-20 D1タイプ, パネルゾーン周辺の変位

(5) D2タイプ試験体

この試験体はD1タイプと全く同じ補強形式であるが, この補強形式の効果をより詳しく観察するため, 柱, はりをひと回り小さくした試験体である。寸法の違いによる効果はほとんど存在せず, 実験結果はD1タイプ試験体と同じ傾向を示す。この試験体の鉛直変位及びパネルゾーン周辺の変位の結果を Fig-21 及び Fig-22 に示す。この試験体の弾性限荷重は 90ton 程度で, 最大耐力は 188.5ton であった。この結果からも D1タイプと傾向は変わらない。

以上の各試験体共耐力は全てパネル部の降伏によって決定され, 柱及びはり共一部分が塑性域にはいることはあっても, ほぼ弾性を保ち局部的な破壊等は見受けられなかった。この事は柱及びはり端部のワイヤーストレインゲージの測定からも確かめられた。

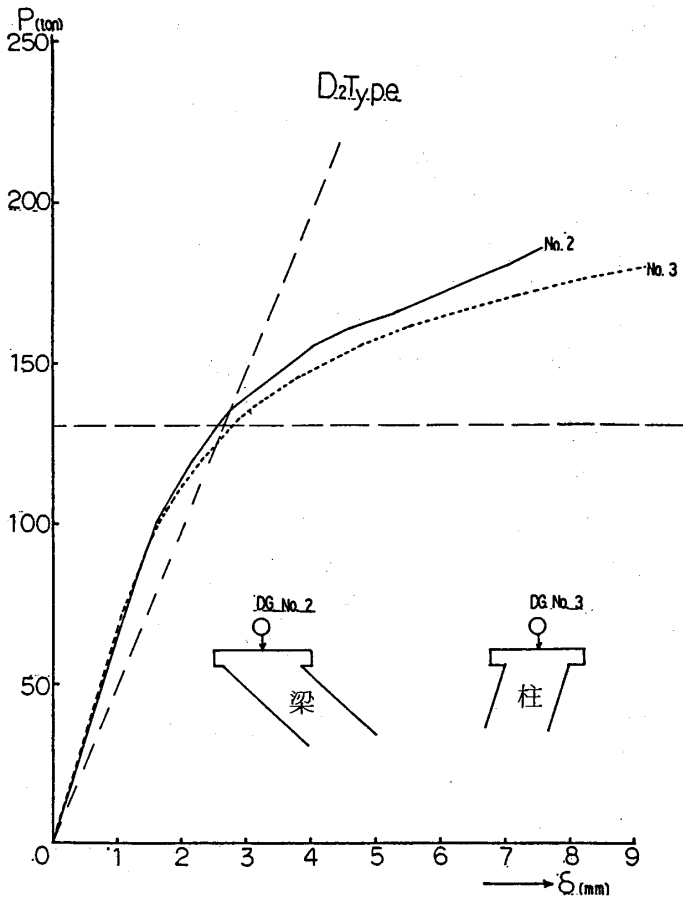


Fig-21 D2タイプの荷重-変位曲線

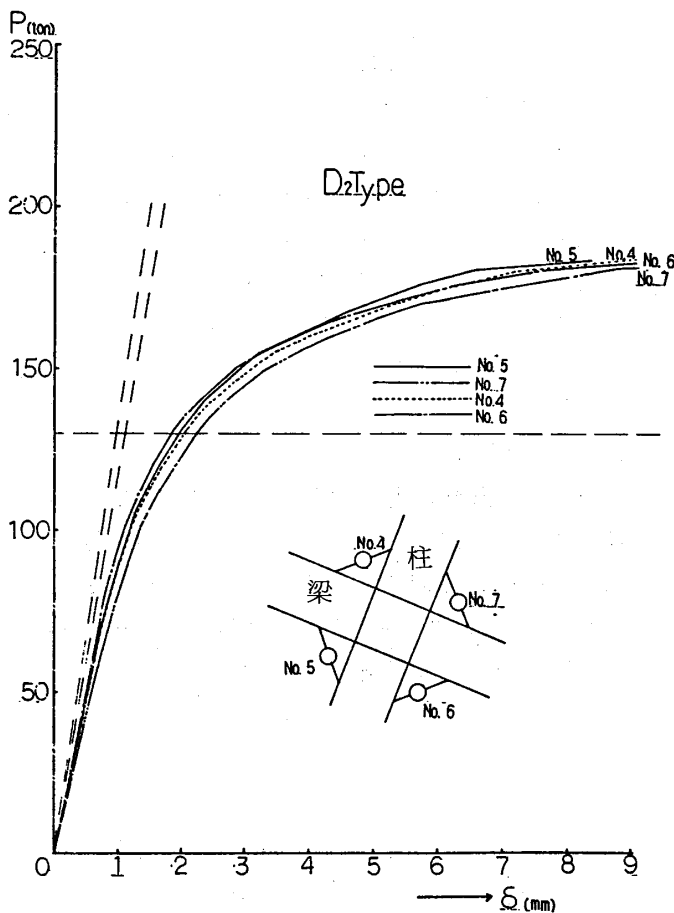


Fig-22 D2タイプ、パネルゾーン周辺の変位

§ 4 考察

4.1 降伏荷重

試験体の重心に荷重Pを加えた場合の柱及びはり端部の断面力はFig-23を参照して次式で与えられる。

$$P_c = \frac{l \cos \theta}{l \cos \theta + h \sin \theta} P \dots \dots \dots (1)$$

$$P_B = \frac{l \sin \theta}{l \cos \theta + h \sin \theta} P \dots \dots \dots (2)$$

$$H_c = P_c \cos \theta \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_c = P_c \sin \theta \dots \dots \dots (4)$$

$$M_c = h(1-\mu)P_c \sin \theta \dots \dots \dots (5)$$

$$M_B = P_B \sin \theta \dots \dots \dots (6)$$

$$Q_B = P_B \cos \theta \dots \dots \dots (7)$$

$$M_B = l(1-\lambda)P_B \cos \theta \dots \dots \dots (8)$$

但し Suffix C, Bはそれぞれ柱及びはりを表わし, N, Q, Mはそれぞれ軸力, せん断力, 曲げモーメントを表わす。ここで柱及びはり端のモーメントは全てH型钢フランジにより負担されると仮定すると, これらのモーメントは等価なせん断力に置換され, 結局パネルゾーンにかかるせん断力は次式で近似される。

$$Q_{cp} = \frac{M_B}{\mu h} - Q_c$$

$$= \frac{1-\lambda-\mu}{\mu} \cdot \frac{l \cos \theta \cdot \sin \theta}{l \cos \theta + h \sin \theta} \cdot P \dots \dots (9)$$

$$Q_{bp} = \frac{M_C}{\lambda l} - Q_p$$

$$= \frac{-1+\lambda+\mu}{\lambda} \cdot \frac{h \cos \theta \cdot \sin \theta}{l \cos \theta + h \sin \theta} \cdot P \dots \dots (10)$$

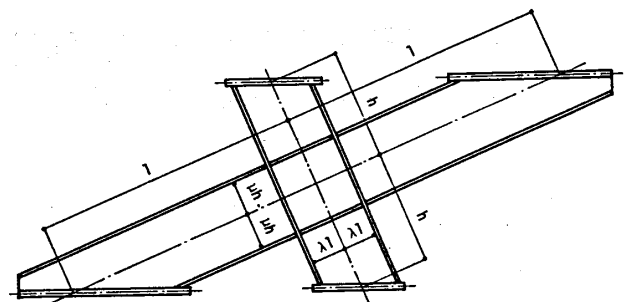


Fig-23 柱及びはりの寸法

次に降伏荷重を求めるが、一般に鋼構造に対しては Mises の提案した降伏条件式が実験に対して最もよく当てはまる。すなわち Mises の一般式は次式となる。

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_Y^2 \dots\dots\dots (11)$$

ただし σ_Y ; 材料の単純引張における塑性流動応力、ここで一般の2次元問題を考えると Z 方向の応力は 0 となり、

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} = \sigma_Y \dots\dots\dots (12)$$

この式を降伏条件式として用いる。

4. 2 変形の解析

(1) 鉛直変位

部材力 M, N, Q による鉛直方向変位は Fig-24 を参照して

$$\begin{aligned} \delta v &= c\delta v + \frac{L \sin^2 \theta}{L} (B\delta v - c\delta v) \\ &= (1 - \sin^2 \theta) c\delta v + B\delta v \sin^2 \theta \\ &= c\delta v \cos^2 \theta + B\delta v \sin^2 \theta \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ここで $c\delta v = (c\delta v_M + c\delta v_Q) \sin \theta + c\delta v_N \cos \theta \dots\dots\dots (14)$

$B\delta v = (B\delta v_M + B\delta v_Q) \cos \theta + B\delta v_N \sin \theta \dots\dots\dots (15)$

で $\delta v_M, \delta v_Q, \delta v_N$ はそれぞれ曲げ, せん断, 軸力による変位を表わす。

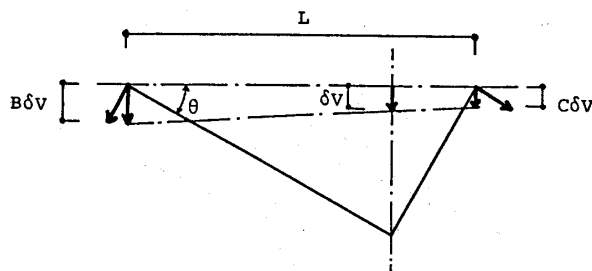


Fig-24 鉛直変位の求め方

またパネルゾーンのせん断変形による変形角 r_p は Fig-25 の如く $r_p/2$ ずつ柱, はりに等分に分配されると仮定すると、

$$\begin{aligned} c\delta v_p &= \left\{ \frac{r_p}{2} (1 - \mu) h - \frac{r_p}{2} (\mu h) \right\} \sin \theta \\ &= \frac{r_p}{2} (1 - 2\mu) h \sin \theta \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$B\delta v_p = \frac{r_p}{2} (1 - 2\mu) \ell \cos \theta \dots\dots\dots (17)$$

となり、パネルのせん断変形による鉛直変位は

$$\begin{aligned} \delta v_p &= \frac{r_p}{2} \{ (1 - 2\mu) h \sin \theta \cos^2 \theta + (1 - 2\lambda) \ell \sin^2 \theta \cos \theta \} \\ &= \frac{r_p}{4} \{ (1 - 2\mu) h \cos \theta + (1 - 2\lambda) \ell \sin \theta \} \sin^2 \theta \dots\dots (18) \end{aligned}$$

で表わされる。それ故ダイアルゲージに表われる鉛直変位は

$$\begin{aligned} \delta &= 2(\delta v + \delta v_p) \\ &= 2c\delta v \cos^2 \theta + 2B\delta v \sin^2 \theta + \frac{r_p}{2} \{ (1 - 2\mu) h \cos \theta + \\ &\quad (1 - 2\lambda) \ell \sin \theta \} \sin^2 \theta \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

となる。

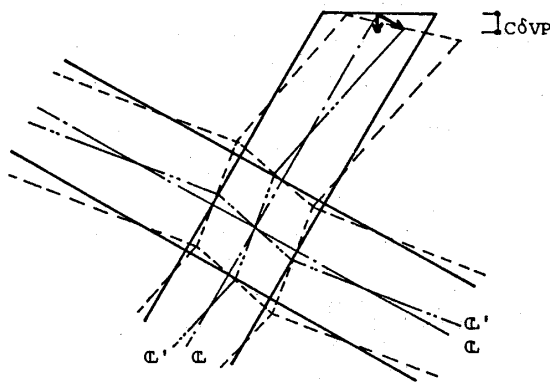


Fig-25 パネルゾーンによる変形

(2) パネルゾーンのせん断変形

パネルゾーンが一樣なせん断が Q と受けた時のせん断変形角はウェブの断面積を A_w として、次式となる。

$$r_p = \frac{\kappa Q}{G A_w} \dots\dots\dots (20)$$

ただし $\kappa = \int \frac{k}{A} dA$

Dタイプのように直交方向のフランジもせん断力に抵抗する場合には Fig-26 のようにウェブと直交方向フランジにせん断力を分担して、

$$Q_F = \frac{\alpha_w}{\alpha_F + 2\alpha_w} Q_{cp} \dots\dots\dots (21)$$

$$Q_w = \frac{\alpha_F}{\alpha_F + 2\alpha_w} Q_{cp} \dots\dots\dots (22)$$

ここに α_F, α_w は等価せん断剛性で

$$\alpha_F = \frac{\kappa (2\mu h)}{G A_F} + \frac{(2\mu h)^3}{12 E I_F} \dots\dots\dots (23)$$

$$\alpha_w = \frac{\kappa(2\mu h)}{GA_w} + \frac{(2\mu h)^3}{12EI_w} \dots\dots\dots(24)$$

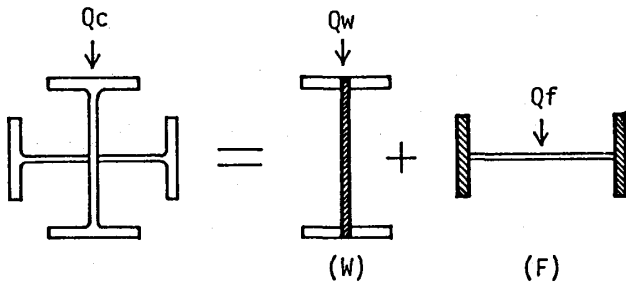


Fig - 26 十字形断面のせん断力の分担

となる。パネルゾーンの変形は以上の式により評価して解析する。次にパネルゾーン周辺に配したダイヤルゲージ (No.4~7) の変位について考える。(Fig-6 参照) これらのダイヤルゲージにはパネルの角変化による変位と部材の曲げ、せん断変形、及び軸方向変形による変位が重なって現われることになる。ここに現われる変位量を \$\delta\$ とすると次式から計算される。

$$\delta = \frac{S_1 + S_2}{2} + \frac{a}{\sqrt{2}} \Delta\theta \dots\dots\dots(25)$$

$$\text{但し } S_1 = \int_0^a \left(\frac{N_B}{EA_B} + \frac{M_B}{EZ_B} \right) dx$$

$$S_2 = \int_0^a \left(\frac{N_c}{EA_c} + \frac{M_c}{EZ_c} \right) dx$$

$$\Delta\theta = r_p + R_B + R_c$$

$$R_B = \frac{1}{a} \left\{ \int_0^a \frac{MM}{EI_B} dx + \int_0^a \frac{QQ}{GA_B} dx \right\}$$

$$R_c = \frac{1}{a} \left\{ \int_0^a \frac{MM}{EI_c} dx + \int_0^a \frac{QQ}{GA_c} dx \right\}$$

\$a\$: ダイヤルゲージまでの距離

以上の解析結果を実験結果と共に図示する。解析は実験結果とよく一致している。

§ 5. 光弾性実験による応力解析

5. 1 光弾性材料及び試験体

柱、はり接合部及び近傍の応力を解析するため 1/5 モデルによる光弾性実験を行なった。フランジ及びウェブの厚みは 1/5 の厚みの板を作るのは容易でないため最小板厚を 3mm とし、フランジの厚みは 1.5 倍の 4.5mm を使用した。Fig-27 に試験体の概要を示すが試験体は A タイプ、C タイプ、D タイプの 3 通りの試験体である。

(Fig-28 ~ Fig-30 参照)

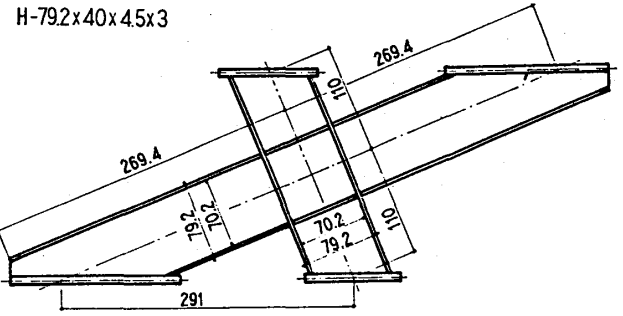


Fig - 27 試験体の概要

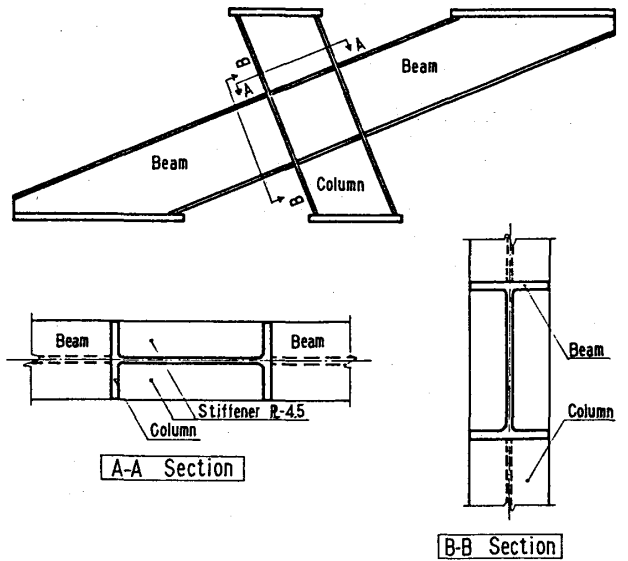


Fig - 28 Aタイプ試験体

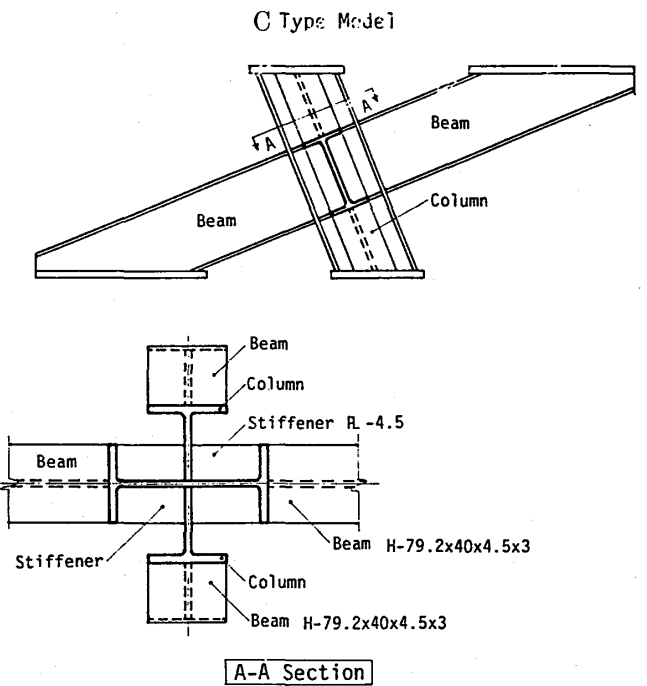


Fig - 29 Cタイプ試験体

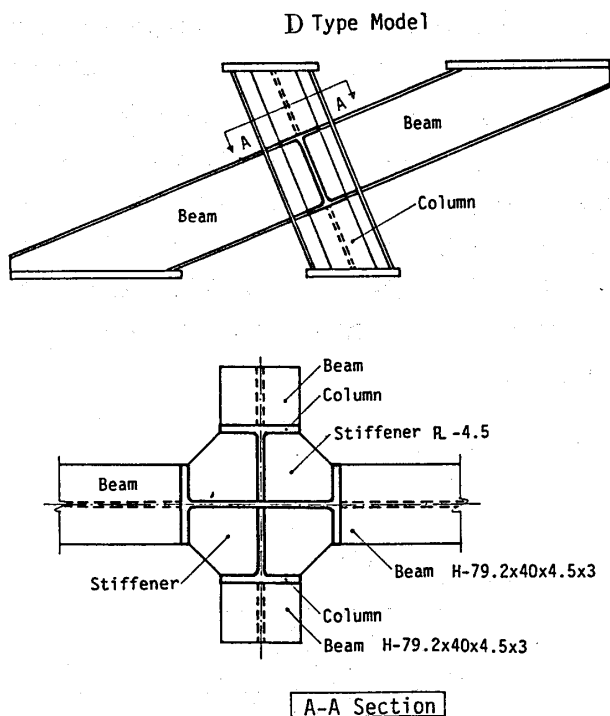


Fig-30 Dタイプ試験体

実験には応力凍結法を用い、光弾性材料にはエポキシ系のアラルライトB（ハードナー901）を重量比10：3で混合して製作した。本実験に用いた光弾性材料のヤング係数E，光弾性感度 α ，フリンジ応力SをTable-1にまたエポキシ樹脂の応力凍結の熱サイクルをFig-31に示す。

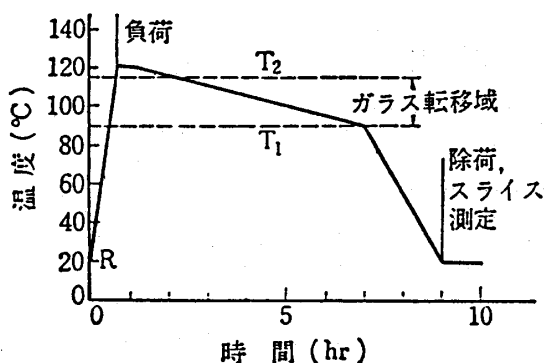


Fig-31 応力凍結の熱サイクル

Table-1 光弾性材料の物理特性

	ヤング係数 E (kg/mm ²)	光弾性感度 α (mm/kg)	フリンジ応力 S (kg/mm)
常温	300	0.94	1.07
高温	1.54	39.5	0.0253

5.2 パネルゾーンの応力解析

柱及びはりがあり理論に従う場合，パネルゾーン周囲の境界の応力分布をFig-32のようになるのとすると，応力関数は次式で表わされる。⁽²⁾

$$\phi = \frac{b_4}{3.2} x^3 y + \frac{d_4}{3.2} x y^3 + \frac{a_2}{2} x^2 + b_2 x y + \frac{C_2}{2} y^2 \dots 26$$

ϕ は次の適合条件式を満足する。

$$\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \dots 27$$

パネルゾーンの応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ は，

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = d_4 x y + C_2 \dots 28$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = b_4 x y + a_2 \dots 29$$

$$\tau_{xy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} = -\frac{b_4}{2} x^2 - \frac{d_4}{2} y^2 - b_2 \dots 30$$

となり，各係数は境界条件より求まる。

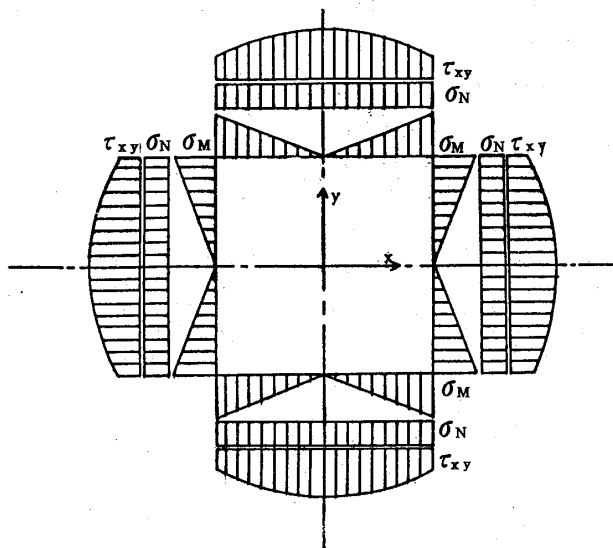


Fig-32 パネルゾーンの境界条件

5.3 光弾性実験結果及び考察

Fig-33～Fig-35に光弾性実験の等色線から得られた主応力線図を示す。光弾性実験では連続的な応力分布を比較的容易に求めることが可能であり，特に主応力の傾きを表わす主応力線図では主応力の流れを連続的に求めることができ，解析には都合がいい。Fig-33はこのようにして求められた，はりウェブの主応力の流れを示す。ウェブはせん断力が高いため，ほぼ45方向に

主応力が傾いている。Fig-34はAタイプ柱及びパネルゾーンの主応力線図であるが、ここでもせん断力の影響が大きく、ほぼ45°方向に主応力が傾いていて特にパネルゾーンは周辺を除いて45°方向を向いている。すなわちパネルゾーンは純せん断に近い状態だと言えよう。

Fig-35(左)はCタイプ、Fig-35(右)はDタイプのパネル部での主応力線図を示し、Aタイプと同様ほぼ45°である。

パネルゾーンの等傾線は40°~50°程度で45°の場合にはほぼ全面が真黒になり、せん断力が卓越している。

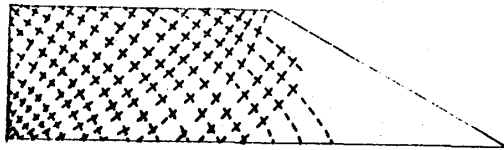


Fig-33 はりの主応力線図

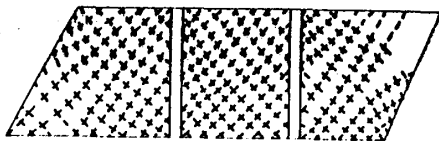


Fig-34 Aタイプ、柱及びパネルゾーンの主応力線図



Fig-35 Cタイプ及びDタイプ、パネルゾーンの主応力線図

Fig-36~37はウェブ面(はり)の応力解析結果であるが、はり理論とよく一致している。

Fig-38~44は各タイプのパネルゾーンでの応力分布を求めた結果であるが、各タイプ共応力関数による解析結果とほぼ一致している。すなわちパネルゾーン内部の概略的な応力分布は、26式による応力関数によって、予測してもほぼ間違いないものと思われる。

パネルゾーンの応力はせん断力が支配的であり、せん断力の分布はパネルゾーン中心部で最大となる。しかしながらPhoto-1~2にパネルゾーン及びそのステフナーの等色線写真を示すが、パネルゾーンの隅角部は明きら

かに応力集中を生じている。特に柱の圧縮側フランジのステフナーに応力が集中する。すなわち柱の圧縮側フランジは柱軸力の負担とパネル部に加わる偶力が圧縮となるため高い応力集中を生じ、逆方向では偶力が引張りとなるため軸力と相殺されて応力集中は生じない。しかしながらこの応力集中はパネルゾーンの隅角部の小部分のみであり、全体の挙動にはあまり影響を与えていない。これにはステフナーの剛性がかかり寄与するものと思われる。

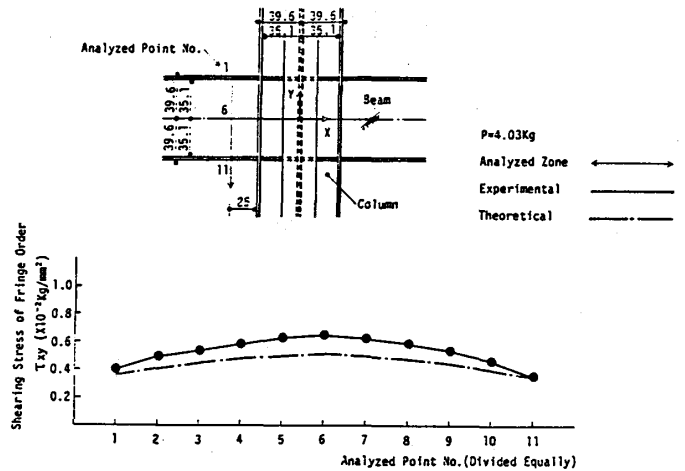


Fig-36 はりの応力分布

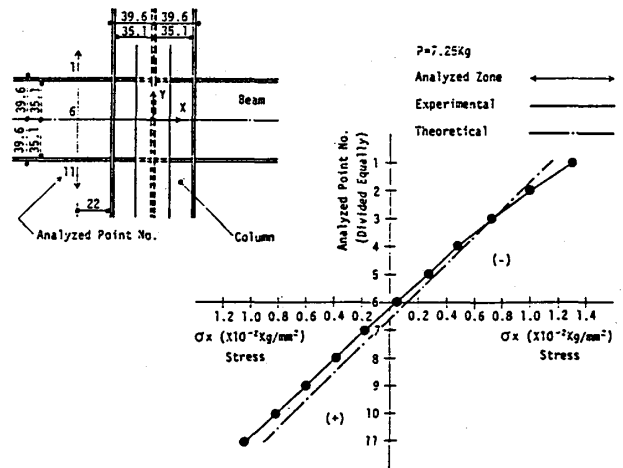


Fig-37 はりの応力分布

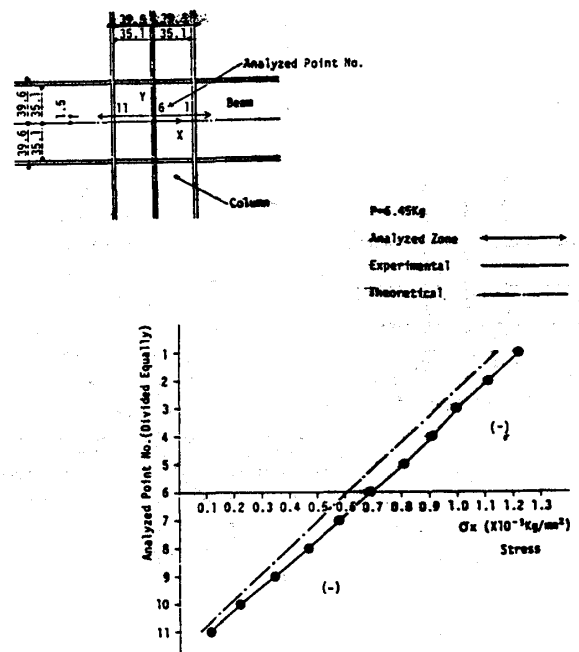
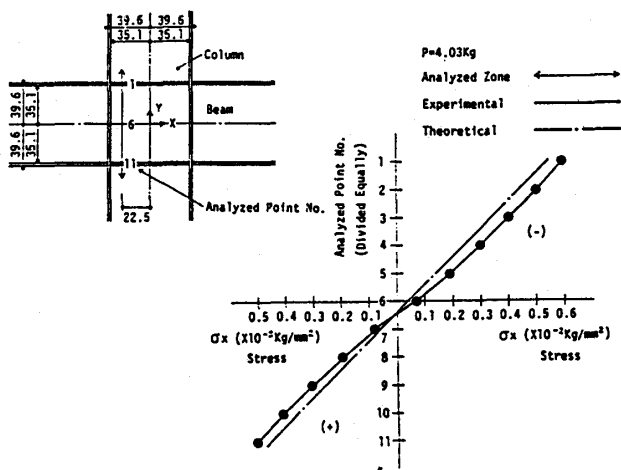
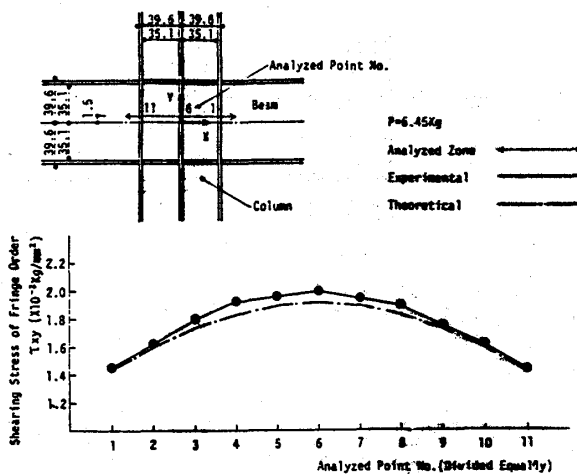
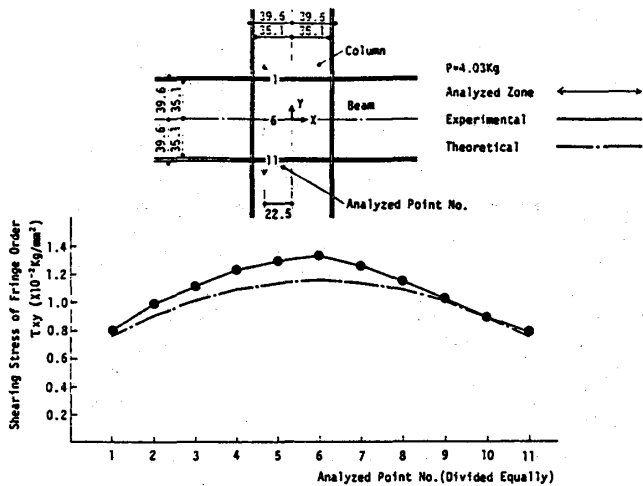


Fig-39 Aタイプ、パネルゾーンの応力分布

Fig-41 Cタイプ、パネルゾーンの応力分布

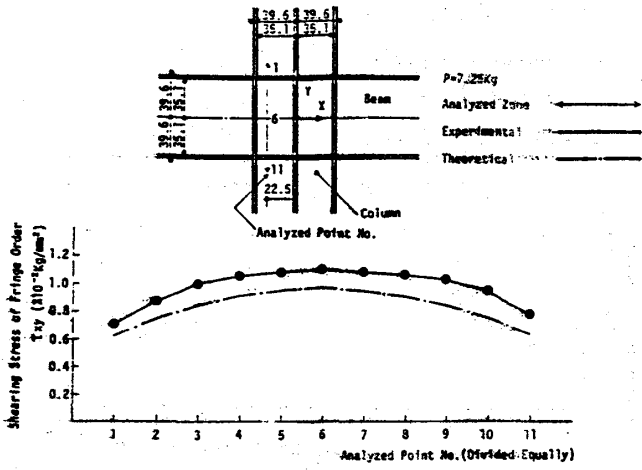


Fig-42 Dタイプ, パネルゾーンの応力分布

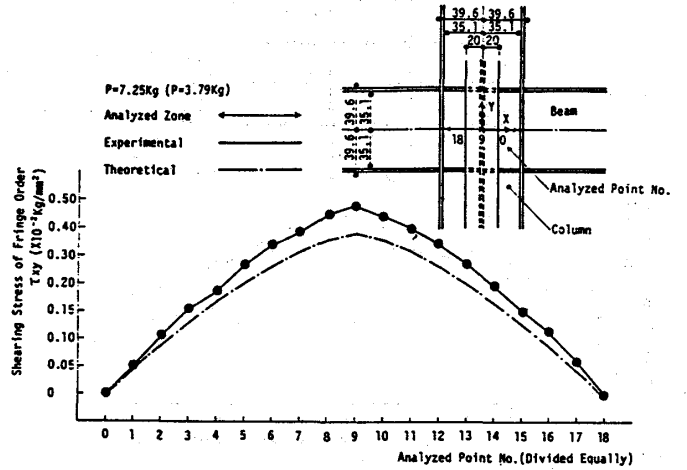


Fig-44 Dタイプ直交, フランジの応力分布

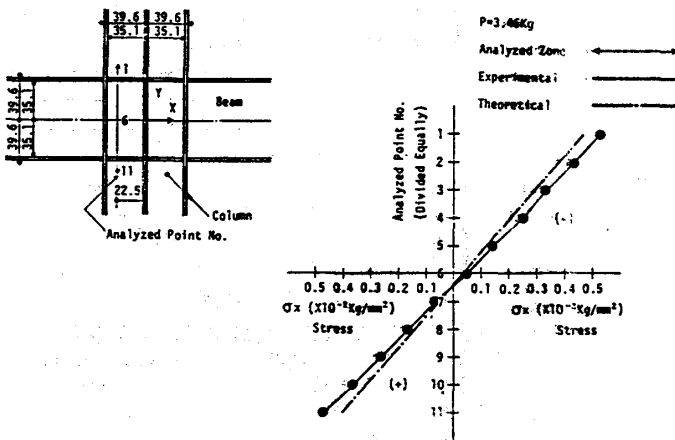


Fig-43 Dタイプ, パネルゾーンの応力分布

§ 6. 総括

柱、はり接合部の挙動とその補強効果を調べる目的で以上の実験を行なったが、これらの結果をまとめて次のように結論づけることができよう。

(1) パネルゾーンの補強効果は、ダブルプレートをつけたBタイプが一番補強効果は高い。すなわち補強効果の順番は、Bタイプ>Dタイプ>Cタイプ>Aタイプとなる。

(2) しかしながらダブルプレートを溶接したBタイプの場合、パネル部の座屈のため耐力の上昇はあまり見られない。また同様に面外に拘束のないAタイプの場合もパネル部の座屈のため、パネル部の降伏後はあまり耐力が大きくならなかった。

(3) これに比較してパネル部を直交方向のフランジで補強したCタイプ及びDタイプの場合、パネルの降伏後も耐力は上昇し続け、パネル部の面外方向を拘束する効果は非常に大きい。

(4) 直交方向フランジをステフナーでつないでないCタイプは、パネルゾーンの補強効果はほとんど期待できずパネルの面外座屈の防止程度の補強効果しかないが、ステフナーで直交方向フランジを一体化したDタイプは補強効果が非常に大きい。特に施工性との関連からいくとDタイプの補強が一番効果を期待できると言えよう。

(5) パネルゾーンの応力分布は光弾性実験の結果からも明らかなようにせん断力が支配的であり、パネルゾーンにかかる力をせん断力に分解する設計手法が妥当なものだと考えられよう。

(6) パネルゾーンの応力は中央部で最大となるが、隅角部には応力集中が生じるため、降伏はこの部分から始まると考えられる。この補強にはステフナーが有効であり、直交方向フランジをステフナーで一体化した補強形式が施工性と相俟って望ましい補強形式と言えよう。

謝辞

この研究は、KK竹中工務店との共同実験で行なわれたものである。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

(1) 日置興一郎他「接合部パネルのせん断変形を考慮した撓角法」日本建築学会論文報告集 第101号・昭和39年8月。

(2) 仲威雄, 加藤勉他「水平荷重を受ける鋼構造柱, はり, およびその接合部の挙動について」(その1~3) 日本建築学会論文報告集 第101号(昭和39年8月)第102号, (昭和39年9月), 第104号(昭和39年10月)

(3) 加藤勉他「水平力を受ける剛接ラーメン柱梁接合

部(パネルゾーン)の設計式について」JSSC, vol 5, №40, 1969。

(4) 田中尚「柱・はり, 接合部必要パネル厚の計算式」日本建築学会論文報告集 第207号 昭和48年5月。

(5) 加藤勉, 中尾雅躬「H型鋼強軸交叉型パネルゾーン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 昭和51年10月

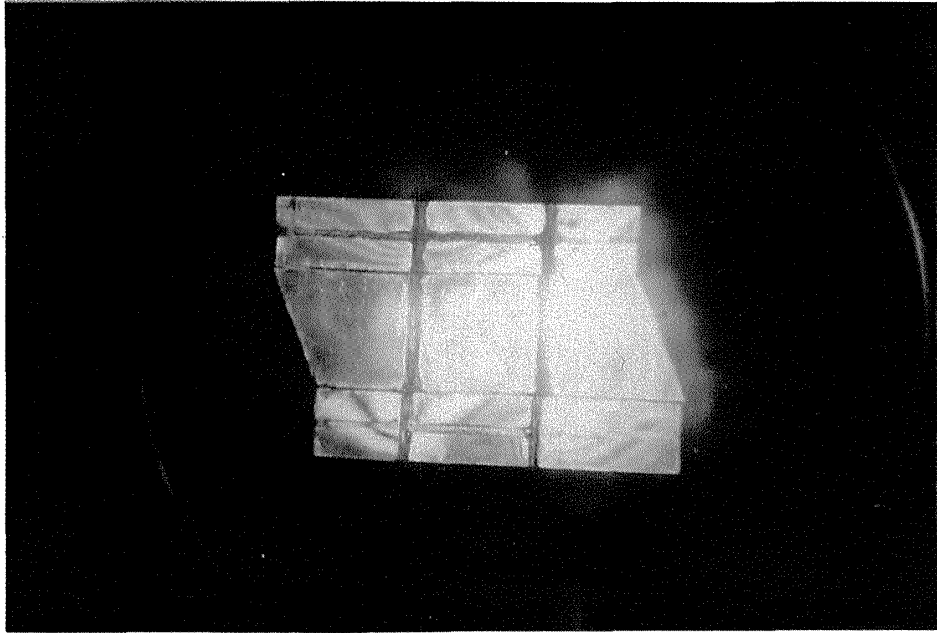


Photo-1 Aタイプ試験体の等色線
(柱フランジ及びウェブ)

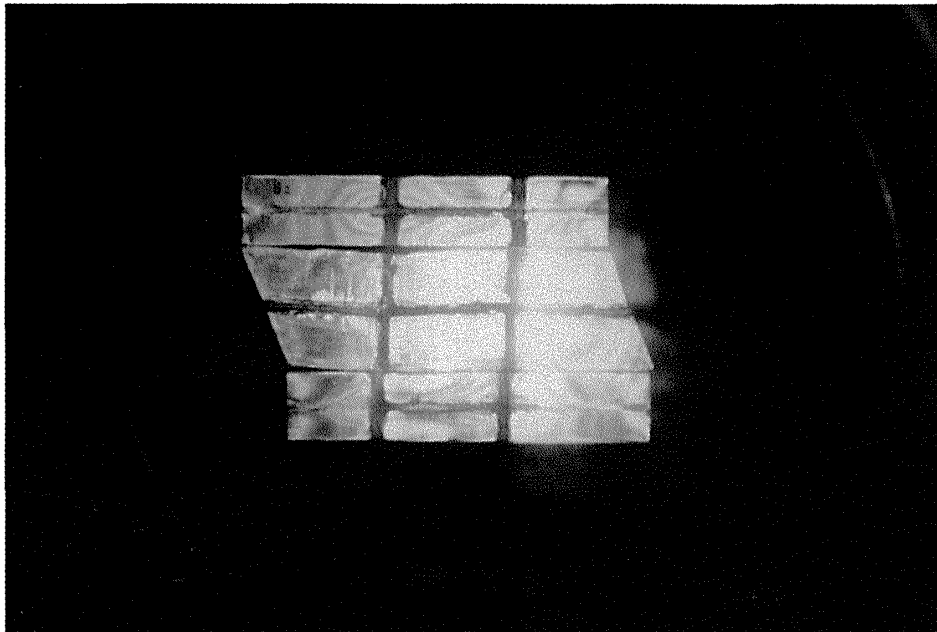


Photo-2 Cタイプ試験体の等色線
(柱フランジ及びウェブ)